

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ
КАФЕДРА АКУСТИКИ ТА АКУСТОЕЛЕКТРОНІКИ

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ В.С. Дідковський
(підпис)

“ ____ ” травня 2018р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 171 Електроніка

на тему: «Підвищення енергоефективності п'єзоелектричних генераторів напруги»

Виконала: студентка __2__ курсу, групи ДГ-61м

_____ Кинкурогова Анастасія Василівна _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник професор кафедри ААЕ, д.т.н., Артеменко М.Ю _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, , прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент доцент кафедри ПЕ, к.т.н., Батрак Л.М. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.
Студентка _____
(підпис)

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут (факультет) _____ Електроніки _____
(повна назва)

Кафедра _____ Акустики та акустoeлектроніки _____
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність _____ 171 Електроніка _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В.С. Дідковський
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ травня _____ 2018 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Кинкурової Анастасії Василівни
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Підвищення енергоефективності п'єзоелектричних генераторів напруги» _____,
науковий керівник дисертації _____ Артеменко М.Ю., д.т.н., професор кафедри
А та АЕ _____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «09» лютого 2018 р. № 691-с _____

2. Строк подання студентом дисертації _____ 11.05.2018р. _____

3. Об'єкт дослідження – процес перетворення механічної енергії вібрацій в електричну енергію з використанням прямого п'єзоелектричного ефекту _____

4. Предмет дослідження – оптимізація геометричних розмірів п'єзоелектричного віброгенератора напруги для отримання максимальної вихідної електричної потужності при максимальній напрузі в залежності від частоти та прискорення вимушених коливань, матеріалів п'єзоелектричного перетворювача, їх механічних параметрів та опору навантаження _____

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

1) дослідити схемні моделі п'єзоелектричних генераторів напруги;

2) розробити способи їх оптимізації з метою отримання максимальної вихідної потужності при максимальній напрузі;

3); обрати напрями подальшого вдосконалення п'єзоелектричних генераторів напруги для підвищення їх енергоефективності.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу презентація Power Point

7. Орієнтовний перелік публікацій:
публікація двох доповідей на науково-технічних конференціях молодих вчених

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання 12 лютого 2018р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів	Примітка
1	Аналітичний огляд літературних джерел	12.02.2018 – 12.03.2018	
2	Дослідження схемних моделей п'єзоелектричного віброгенератора	13.03.2018 – 14.04.2018	
3	Оптимізація схемних моделей	15.04.2018 – 25.04.2018	
4	Напрями вдосконалення п'єзоелектричних віброгенераторів	26.04.2018 – 03.05.2018	
5	Оформлення пояснювальної записки та презентації	04.05.2018 – 10.05.2018	

Студент

(підпис)

А.В. Кинкуорова
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

М.Ю. Артеменко

Реферат

Магістерська дисертація містить основну частину на 75 аркушів, 28 ілюстрації, 23 таблиці, 2 додатки.

Актуальність теми. В даний час в усьому світі розробка, дослідження і створення п'єзоелектричних генераторів є досить актуальною і важливою проблемою, що привертає велику кількість дослідників. Інтерес до цієї проблеми обумовлений перспективою створення малогабаритних незалежних і практично невичерпних джерел живлення різних автономних пристроїв радіоелектроніки. Такі джерела перетворюють енергію вібрацій, присутніх практично скрізь, в електричну енергію і не вимагають наявності зовнішніх джерел живлення або необхідності постійних витрат на періодичну заміну батарей і на їх хімічну переробку.

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження – підвищення енергоефективності п'єзоелектричних генераторів напруги шляхом дослідження та оптимізації їх схемних моделей. Задача дослідження – дослідити схемні моделі п'єзоелектричних генераторів напруги; розробити способи їх оптимізації з метою отримання максимальної вихідної потужності при максимальній нарузі; обрати напрями подальшого вдосконалення п'єзоелектричних генераторів напруги для підвищення їх енергоефективності.

Об'єкт дослідження. Процес перетворення механічної енергії вібрацій в електричну енергію з використанням прямого п'єзоелектричного ефекту.

Предмет дослідження. Оптимізація геометричних розмірів п'єзоелектричного віброгенератора напруги для отримання максимальної вихідної електричної потужності при максимальній нарузі в залежності від частоти та прискорення вимушених коливань, матеріалів п'єзоелектричного перетворювача, їх механічних параметрів та опору навантаження.

Методи дослідження. Застосовувався метод електромеханічних аналогій для побудови комплексної схеми заміщення п'єзоелектричного віброгенератора та теорія чотириполіосників для виведення умов забезпечення його узгодженого режиму.

Наукова новизна одержаних результатів. В результаті застосування теорії чотириполіосників до дослідження схемної моделі п'єзоелектричного віброгенератора напруги типу кантилевер отримані нові умови забезпечення його узгодженого режиму, при яких вихідна потужність досягає максимуму. Сформульована нова оптимізаційна задача розрахунку геометричних розмірів п'єзоелектричної пластини, що максимізують вихідну напругу п'єзоелектричного віброгенератора в узгодженого режиму та встановлені нові обмеження цієї задачі.

Практичне значення одержаних результатів. Методом послідовного квадратичного програмування в середовищі Matlab були оптимізовані геометричні розміри п'єзоелектричної пластини віброгенератора напруги. У порівнянні з прототипом при тому ж значенні вихідної потужності вихідна напруга збільшена в 3.78 рази, що забезпечило підвищення к.к.д. системи перетворення енергії на 10.1%. Отримані результати дисертації впроваджено в ТЗОВ «ТЕЗІС СПЕЦПРОЕКТ», що підтверджено актом впровадження.

Публікації. 1. А.В. Кинкурогова. Оптимізація геометричних розмірів п'єзоелектричного віброгенератора // XI Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка-2018». – К: «НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». – 2018. – с.42-45. 2. А.В. Кинкурогова. Розрахунок оптимальних розмірів п'єзоелектричного віброгенератора напруги // XVII Всеукраїнська наукова конференція молодих вчених та студентів «Наукові розробки молоді на сучасному етапі». – К: «Київський національний університет технологій та дизайну». – 2018.

Ключові слова: п'єзокераміка, п'єзоелектричний віброгенератор, п'єзоелектричний ефект, біморф, кантилевер, харвестер.

Abstract

This thesis contains the main part on 75 pages, 28 illustrations, 23 tables, 2 appendixes.

Actuality of theme. Currently, the development, research and creation of piezoelectric generators around the world is a very relevant and important problem attracting a large number of researchers. The interest in this problem is due to the prospect of the creation of small-scale independent and virtually inexhaustible power supplies of various stand-alone devices of radio electronics. Such sources convert the energy of vibrations present almost everywhere into electrical energy and do not require the availability of external power supplies or the need for constant costs for the periodic replacement of batteries and for their chemical processing.

The goal and tasks of the research. The goal is to improve the energy efficiency of piezoelectric voltage generators by researching and optimizing their circuit models. The task of the research is to investigate the schematic models of piezoelectric voltage generators; to develop ways of their optimization in order to obtain maximum output power at maximum voltage; choose the direction of further improvement of piezoelectric voltage generators to increase their energy efficiency.

The object of the research. The process of converting the mechanical energy of vibrations into electric energy using a direct piezoelectric effect.

The subject of the research. Optimization of the geometric dimensions of the piezoelectric vibration generator to obtain the maximum output electric power at maximum voltage, depending on the frequency and acceleration of forced oscillations, the materials of the piezoelectric converter, their mechanical parameters and load resistance.

Scientific novelty of the obtained results. As a result of the application of the theory of quadrupole to the study of the schematic model of a piezoelectric

vibration generator of the type of cantilever, new conditions for ensuring its coherent regime, at which the output power reaches a maximum. A new optimization problem for calculating the geometric dimensions of a piezoelectric plate is formulated, which maximizes the output voltage of a piezoelectric vibration generator in a coherent regime and establishes new restrictions for this problem.

Research methods. The method of electromechanical analogies was used to construct a complex scheme for replacing a piezoelectric vibration generator and the theory of quadripole for the elimination of the conditions for the provision of its coherent regime.

The practical value of the results. The method of sequential quadratic programming in the Matlab environment optimized the geometric dimensions of the piezoelectric plate of the vibration generator. In comparison with the prototype at the same value of the output power output voltage increased by 3.78 times, which ensured increase k.k.D. systems of transformation of energy by 10.1%. The obtained results of the thesis have been implemented in the "TEZIS SPECPROEKT" LLC, which is confirmed by the act of implementation.

Publications.

1. A. Kynkurohova. Optimization of the geometric dimensions of piezoelectric vibration generator // XI International scientific and technical conference of young scientists "Electronics-2018". - K: NTUU "KPI named after Igor Sikorsky". - 2018. - p.42-45.
2. A. Kynkurohova. Calculation of optimal sizes of piezoelectric vibration generator of voltage // XVII All-Ukrainian scientific conference of young scientists and students "Scientific developments of youth at the present stage". - K: "Kyiv National University of Technology and Design". - 2018

Keywords: piezoceramic, piezoelectricity, piezoelectric vibrohenerator, piezoelectric effect, voltage, bimorf, cantilever, harvester.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ.....	12
ВСТУП	13
РОЗДІЛ I. П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИЙ СПОСІБ ГЕНЕРАЦІЇ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГІЇ.....	15
1.1. Генерація електричної енергії за рахунок перетворення механічної енергії	17
1.1.1. Електромагнітний спосіб перетворення механічної енергії.....	17
1.1.2. Електростатичний спосіб перетворення механічної енергії	19
1.1.3. П'єзоелектричний спосіб генерації електричної енергії	22
1.2. Порівняльний аналіз способів перетворення механічної енергії в електричну	30
1.3. Ефективні параметри п'єзокераміки і монокристалів.....	32
Висновки до розділу 1	38
РОЗДІЛ II. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СХЕМНОЇ МОДЕЛІ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ВІБРОГЕНЕРАТОРА НАПРУГИ	39
2.1. Лінійна схемна модель п'єзоелектричного харвестера.....	39
2.2. Електромеханічні коефіцієнти зв'язку та загасання	42
2.3. Еквівалентна схема п'єзоелектричного харвестера та оптимізація її параметрів для отримання максимальної вихідної потужності при максимальній напрузі	44
2.4. Формулювання та розв'язок оптимізаційної задачі	46
Висновки до розділу 2	50
РОЗДІЛ III. ЕЛЕКТРИЧНІ СХЕМИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ УЗГОДЖЕНОГО РЕЖИМУ ВІБРОГЕНЕРАТОРА	51
3.1. Двонапівперіодний випрямляч з конденсатором.....	51
3.2. Система синхронного вилучення електричного заряду.....	56
3.3. Електронна схема СВЕЗ на основі MOSFET транзисторів	60

3.3.1. Побудова силової частини	60
3.3.2. Перемикач схеми управління	62
Висновки до розділу 3	66
РОЗДІЛ IV. НАПРЯМИ ПОДАЛЬШОГО ВДОСКОНАЛЕННЯ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ НАПРУГИ	67
Висновки до розділу 4	72
РОЗДІЛ V. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ	73
Висновки до розділу 5	82
ВИСНОВКИ.....	83
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	85
Додаток 1	
Додаток 2	

Перелік скорочень, умовних позначень, термінів

MEMS – мікроелектромеханічні системи

PZT – цирконат-титанат свинцю

СВЕЗ – синхронне вилучення електричного заряду

MOSFET-транзистори – високопровідні транзистори з товстим оксидним шаром

ПН – перетворювач напруги

ГН – генератор напруги

SQP – Sequential Quadratic Programming

ПЕ – п'єзоелектричний ефект

ВСТУП

З розвитком технологій людство освоює різноманітні види відновлюваної енергії. З'явилися сонячні панелі, вітрові електростанції, сонячні концентратори, п'єзогенератори, суперконденсатори і інші пристрої, які допомагають людям отримувати альтернативну енергію і зберігати її. Більшість з цих пристроїв вже використовуються в повсякденному житті.

Останнім часом люди постійно шукають альтернативу звичайним батарейкам та невеликим акумуляторам з малою потужністю споживаної енергії. Пропонуються найрізноманітніші рішення цієї актуальної проблеми. Пріоритет для джерел живлення мобільних телефонів і ноутбуків віддається літій-іонним малогабаритним акумуляторам. Однак ресурс всіх цих типів джерел, як правило, обмежений. Також, звичайні батарейки (пальчикові або мізинчикові), які людство викидає серед іншого побутового сміття, засмічує біля 20 квадратних метрів землі або 400 літрів води важкими металами, такі як цинк, марганець, кадмій, нікель, ртуть та інші. Навіть в невеликих дозах вони можуть нанести шкоду здоров'ю людини. Адже під дією повітря і атмосферних опадів металеве покриття батарейки починає піддаватись корозії. В результаті, метали, з яких складається батарейка, потрапляють у ґрунт, а через нього – в ґрунтові води [2]. Тому, з'явилися спроби зменшити енергоспоживання датчиків і перетворювачів, що входять в систему вимірювання, і створити акумулятори та батареї із довготривалим терміном служби завдяки джерелам супутньої розсіяної енергії [1,3], а також посприяти збереженню навколишнього середовища.

Такий перспективний спосіб живлення невеликих електронних компонентів і віддалених датчиків привертає дослідників і проектувальників з різних областей, включаючи механічні, аерокосмічні, електричні і цивільні, а також дослідників з області матеріалознавства. Так з'явилися різні підходи до моделювання п'єзоелектричного віброгенератора. Математична модель

повинна бути якомога простішою, але в той же час і досить точною, щоб охопити найважливіші явища, необхідні для подання та прогнозування динаміки фізичної системи.

При побудові математичної моделі п'єзоелектричного віброгенератора автори Thorsten Nehn і Yiannos Manoli [22] використовували коливання механічної системи з одним ступенем свободи з зосередженими параметрами. Моделювання систем з зосередженими параметрами є зручним модельним підходом, так як в ньому можуть бути використані параметри п'єзоелемента: конденсатор - через внутрішню ємність п'єзокераміки; резистор - через зовнішню опору навантаження. Зосереджені параметри, що характеризують механічну частину, пов'язані з узагальненою масою і жорсткістю, одержувані з використанням п'єзоелектричних рівнянь.

Результатами обрахунку даної математичної моделі є значення вихідної потужності 323 мкВт при значенні вихідної напруги 1,82В. Якщо вважати, що к.к.д. п'єзоелектричного харвестера досягає максимального значення 0.5 а на відкритому транзисторі електронної схеми забезпечення узгодженого режиму напруга знижується на 0.5 В та знехтувати динамічними втратами, коефіцієнт корисної дії прототипа складає 36,3%. Отже, необхідно оптимізувати дану модель, щоб збільшити к.к.д. п'єзоелектричного віброгенератора.

Метою роботи є підвищення енергоефективності п'єзоелектричних генераторів напруги шляхом дослідження та оптимізації їх схемних моделей.

Задачі роботи - дослідити схемні моделі п'єзоелектричних генераторів напруги; розробити способи їх оптимізації з метою отримання максимальної вихідної потужності при максимальній напрузі; обрати напрями подальшого вдосконалення п'єзоелектричних генераторів напруги для підвищення їх енергоефективності.

РОЗДІЛ І. П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИЙ СПОСІБ ГЕНЕРАЦІЇ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГІЇ

Генерація енергії - виробництво електроенергії (електричної напруги і струму) за допомогою перетворення її з інших видів енергії за допомогою спеціальних технічних пристроїв.

Існують наступні види генерації відновлюваної енергії: сонячна батарея або фотоелемент – електронний прилад, який перетворює енергію електромагнітного випромінювання, в основному світлового діапазону, в електричну енергію;

- хімічні джерела струму – перетворення частини хімічної енергії в електричну, за допомогою хімічної реакції;
- радіоізотопні джерела електроенергії;
- електричний генератор – електрична машина, у якій механічна робота перетворюється в електричну енергію [5].

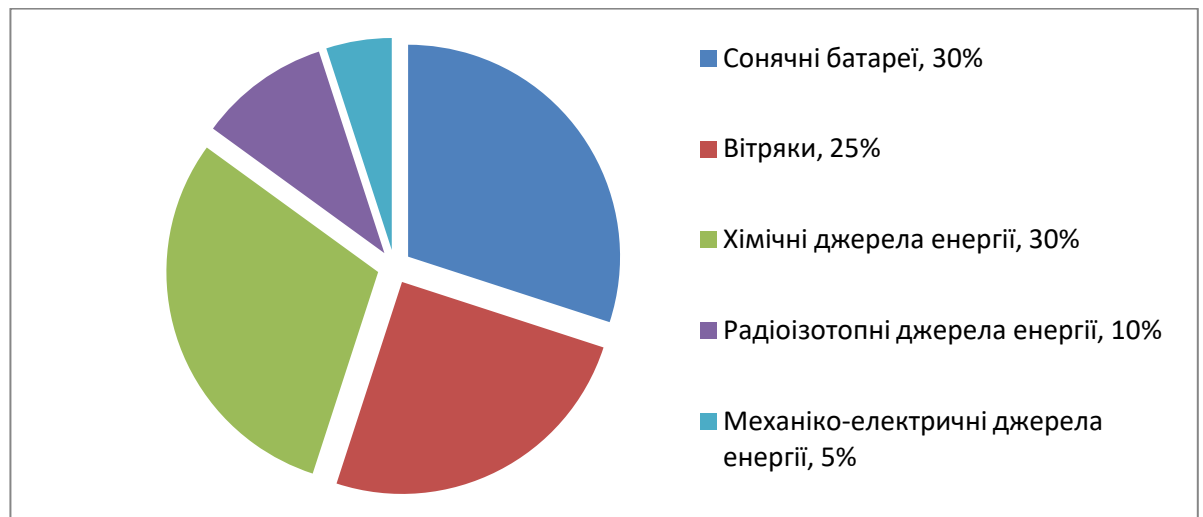


Рис.1.1. Способи генерації відновлюваної енергії

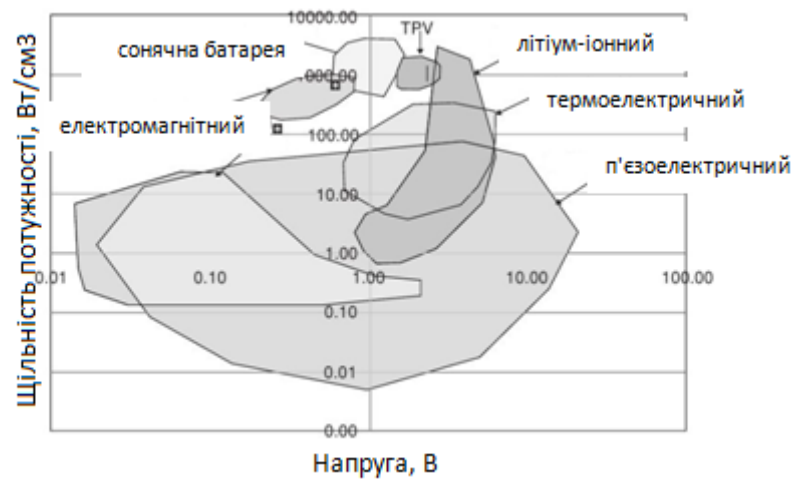


Рис.1.2. Залежність щільності потужності від напруги для різних перетворювачів енергії

Серед видів відновлюваної енергії лише механічна енергія потребує мінімальних фінансових затрат на виготовлення та встановлення утилізуючих пристроїв, вона є постійно діючою, пристрої перетворення енергії з механічної в електричну форму мають максимально довгий термін служби і не створюють екологічних проблем. Питома вага перетворювачів механічної енергії в електричну складає 5% відновлюваної енергетики.

На рис.1.2 видно, що п'єзоелектричний пристрій в порівнянні з іншими джерелами потужності має найбільші показники вихідної потужності, адже необхідний рівень напруги можна отримати безпосередньо з п'єзoeлемента. В п'єзоелектричному пристрої отримання енергії необхідно вхідна напруга або заряд, який необхідно прикласти для створення відносного коливального руху елементів конденсатора і отримання змінного струму на виході [6]. Також, в такому виді перетворення енергії, вихідна напруга визначається властивостями матеріалу, що виключає необхідність зовнішнього джерела напруги [7].

1.1. Генерація електричної енергії за рахунок перетворення механічної енергії

Механічна енергія – це один із видів розсіяної енергії, що проявляється при взаємодії, русі окремих тіл або частинок [8], що оточують всюди - коливання рейок при русі поїзда, взаємодія підшви черевиків людини, що йде, із землею, сила серцебиття – все це можна використовувати для отримання електричної енергії, потрібною у нашому житті. Такі малопотужні джерела енергії можуть користуватися попитом в різних областях: побут, військова область, біомедичні технології та застосування у якості заміни батарейного і провідного живлення у малопотужних системах [2].

1.1.1. Електромагнітний спосіб перетворення механічної енергії

Електромагнітний тип перетворення (електричні генератори) є одним із найпоширеніших. Генератори перетворюють механічну енергію в електричну. Це означає, що для роботи генератора треба обертати його вал будь-яким двигуном. На тепловозі, наприклад, генератор приводять в обертання дизелем, на тепловій електростанції - паровою турбіною, на гідроелектростанції - водяний турбіною.

Принцип дії будь-якої електричної машини заснований на використанні явищ електромагнітної індукції і виникнення електромагнітних сил при взаємодії провідників зі струмом і магнітного поля.

Принцип дії електричного генератора. Найпростішим електричним генератором є виток, що обертається в магнітному полі (рис. 1.3). В цьому генераторі виток 1 являє собою обмотку якоря. Індуктором служать постійні магніти 2, між якими обертається якір 3.

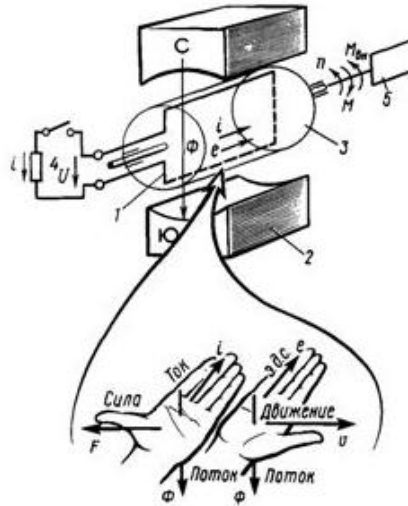


Рис.1.3. Принципова схема електричного генератора

При обертанні витка з певною частотою обертання n його боку (провідники) перетинають магнітні силові лінії потоку Φ і в кожному провіднику індукується ЕРС e . При прийнятому на рис. 1, а напрямі обертання якоря ЕРС в провіднику, розташованому під південним полюсом, згідно з правилом правої руки спрямована від нас, а ЕРС в провіднику, розташованому під північним полюсом, - до нас.

Якщо підключити до обмотки якоря приймач електричної енергії 4, то по замкнутому ланцюзі піде електричний струм I . У провідниках обмотки якоря струм I буде направлений так само, як і ЕРС e .

При зазначеному на рис. 1.3, напрямку струму згідно з правилом лівої руки на провідник, розташований під південним полюсом, буде діяти сила F , спрямована вліво, а на провідник, розташований під північним полюсом, - сила F , спрямована вправо. Зазначені сили створюють спільно електромагнітний момент M , спрямований за годинниковою стрілкою. На рис. 1 видно, що електромагнітний момент M , що виникає при віддачі генератором електричної енергії, спрямований у бік, протилежний обертанню провідників, тому він є гальмівним моментом, що прагнуть уповільнити обертання якоря генератора. Для того щоб запобігти зупинці

якоря, потрібно до валу якоря докласти зовнішній крутний момент $M_{\text{вн}}$, протилежний моменту M і рівний йому за величиною. З урахуванням же тертя і інших внутрішніх втрат в машині зовнішній крутний момент повинен бути більше електромагнітного моменту M , створеного струмом навантаження генератора. Отже, для продовження нормальної роботи генератора до нього необхідно підводити ззовні механічну енергію - обертати його якір будь-яким двигуном 5. При відсутності навантаження (при розімкнутому зовнішньому ланцюзі генератора) має місце режим холостого ходу генератора. У цьому випадку від дизеля або турбіни потрібно тільки таку кількість механічної енергії, яка необхідна для подолання тертя і компенсації інших внутрішніх втрат енергії в генераторі. При збільшенні навантаження генератора, тобто віддається їм електричної потужності $P_{\text{ел}}$, збільшуються струм I , що проходить по провідникам обмотки якоря, і створюваний ним гальмівний момент M . Отже, повинна бути відповідно збільшена і механічна потужність $P_{\text{мх}}$, яку генератор повинен отримати від дизеля або турбіни, для продовження нормальної роботи.

Чим більше електричної енергії споживається, наприклад, електродвигунами тепловоза від тепловозного генератора, тим більше механічної енергії забирає він від крутного його дизеля і тим більше палива необхідно подавати дизелю [9].

Отже, можна підбити підсумок, що електромагнітні пристрої можуть бути використані в технології мікроелектромеханічних систем (МЕМС), використовуючи мікро-турбіни, але вони потребують складної конструкції, а також палива.

1.1.2. Електростатичний спосіб перетворення механічної енергії

Пристрої, що мають не менше ніж дві поверхні, між якими діє електричне поле, називаються електростатичними перетворювачами.

Електричне поле створюється ззовні прикладеною напругою або виникає при дії на вхід перетворювача вимірювального сигналу [8].

Електростатичні прилади мають цілу низку відмінних рис, що обумовлюють їх значні переваги в порівнянні з приладами інших систем. Це, перш за все, мале власне споживання потужності від джерела вимірюваної напруги, порівняно висока точність, можливість використання їх в широкому діапазоні частот (від 20 Гц до 35 МГц), незначна залежність показань від частоти і форми кривої вимірюваної напруги, можливість використання для безпосереднього вимірювання (без застосування вимірювальних трансформаторів напруги) високих напруг (до 300 кВ), незалежність показань від зовнішніх магнітних полів і ін. до основних недоліків цих приладів відносяться: мале значення крутного моменту і низька чутливість, нерівномірна шкала та ін.

Основу всіх електростатичних приладів становлять електростатичні вимірювальні механізми.

Принцип дії електростатичних перетворювачів заснований на взаємодії електричних полів двох тіл (систем пластин), заряджених різнойменними зарядами. В результаті такої взаємодії одна з систем, що є рухомий, переміщається відносно нерухомої системи пластин, викликаючи при цьому відхилення стрілки відлікового пристрою, пов'язаної з рухомою частиною перетворювача, в сторону зростаючих показань. Переміщення рухомої частини перетворювача відносно нерухомої викликає зміна ємності між ними. Конструктивно рухлива і нерухома частини виконуються у вигляді пластин.

Всі існуючі електростатичні перетворювачі можна розділити на два види: перетворювачі, у яких зміна ємності досягається за рахунок зміни активної площі взаємодіючих пластин (рис. 1.4, а), і перетворювачі, у яких ємність змінюється за рахунок зміни відстані між пластинами (рис. 1.4, б).

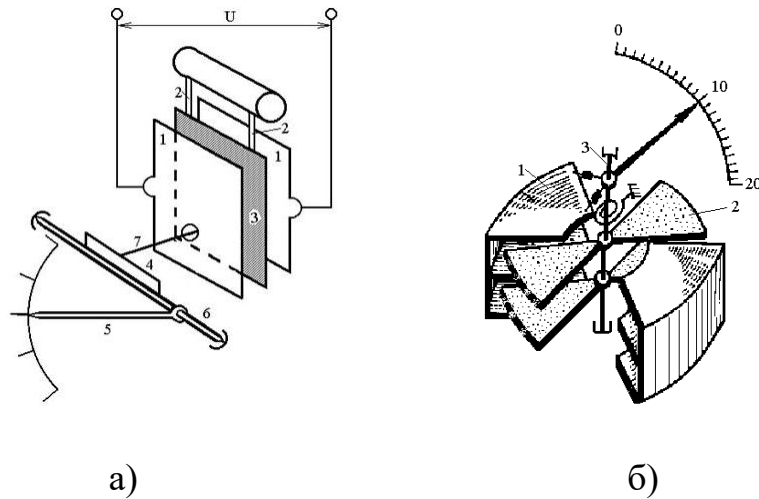


Рис.1.4. Електростатичні перетворювачі

Рухома частина перетворювача зі змінною активною площею пластин (рис. 1.4, а) складається з однієї або декількох тонких алюмінієвих пластин 2, закріплених на осі 3. Нерухома частина утворюється однією або декількома камерами 1, що складаються з металевих пластин з повітряним зазором між ними. Збільшення числа камер і променів у рухливих пластин призводить до підвищення чутливості перетворювача. Форма рухомих і нерухомих пластин вибирається або розраховується виходячи з необхідності забезпечення рівномірного характеру шкали приладу. При подачі на рухомі і нерухомі пластини вимірюваної напруги вони виявляться зарядженими різнойменними зарядами і між ними виникнуть сили електростатичного притягання, в результаті дії яких рухливі пластини будуть повертатися, прагнучи зайти всередину камер. Разом з рухомими пластинами буде повертатися і вісь 3 із закріпленою на ній стрілкою лічильного пристрою. При цьому будуть закручуватися пружні елементи, що створюють протидіючий момент. Рухома частина зупиниться за однакової кількості крутного і протидіє моментів. Значення вимірюваної напруги буде визначатися кутом відхилення стрілки щодо початку шкали. Для заспокоєння рухомої частини в електростатичних перетворювачах використовуються магнітоіндукційні або крильчасті,

повітряні заспокоювачі. Внаслідок того, що обертає момент у електростатичних перетворювачів малий, для збільшення їх чутливості застосовують кріплення рухомої частини на розтяжках і світловий відлік. При цьому зменшуються маса і момент інерції рухомої частини і поліпшується характер шкали.

У електростатичних перетворювачів із змінною відстанню між пластинами (рис. 1.4, б) нерухома частина утворена двома пластинами 1, між якими знаходиться підвішена на тонких непружних металевих підвісах 2 рухома пластина 3, гальванічно з'єднана з однією з нерухомих пластин і ізольована від іншої. При подачі на рухому і ізольовану нерухомих пластини вимірюваної напруги рухлива пластина буде притягатися до різнойменно зарядженої ізольованою нерухомою пластини і одночасно відштовхуватися від однойменно зарядженої нерухомою пластини (незалежно від полярності підключення вимірюваної напруги). Через тягу 7 і місток 4 переміщення рухомої пластини викликає поворот осі 6 із закріпленою на ній стрілкою 5. При цьому виникає протидіючий момент, створюваний масою рухомої пластини. Стале показання стрілки буде при рівності обертаючого і протидіючого моментів. Вольтметри з такими перетворювачами вимагають початкової установки в такий стан, при якому стрілка буде знаходитися на нульовій позначці (при відсутності вимірюваного напруги) [11].

1.1.3. П'єзоелектричний спосіб генерації електричної енергії

П'єзоелектричний перетворювач – пристрій, що призначений для перетворення механічної (електричної) в електричну (механічну). Принцип роботи оснований на використанні п'єзоелектричного ефекту [12].

П'єзоелектрика є формою зв'язку між механічною і електричною поведінками кераміки і кристалів, що належать до певних класів. Звичайна

поляризована фероелектрична кераміка використовується при виготовленні ультразвукових перетворювачів, які визначаються основними співвідношеннями для лінійної п'єзоелектрики, рівняння механічної та електричної рівноваги.

Ці матеріали проявляють п'єзоелектричний ефект, який історично підрозділяється на два явища - прямий і зворотний п'єзоефекти. У найпростішому випадку, коли п'єзоелектричний матеріал механічно деформований, відбувається його електрична поляризація, пропорційна деформації. Цей ефект називається *прямим п'єзоефектом* і він був відкритий братами Кюрі в 1880 році. Якщо цей же матеріал піддати електричній поляризації, то він механічно деформується. Величина механічної деформації пропорційна поляризується полю. Це називається зворотним п'єзоефектом і математично є наслідком основного принципу термодинаміки Г. Липпмана, сформульованого їм в 1881 [13] і експериментально підтвердженого братами Кюрі в тому ж році. Важливо відзначити, що в п'єзоелектричному матеріалі зазвичай присутні одночасно ці два ефекти. Тому, якщо розглядається завдання, в якій прямий п'єзоефект являє головний інтерес (наприклад, в разі отримання енергії з коливань), ігнорування зворотного п'єзоефекту може бути термодинамічно неправильним.

П'єзоефект в деяких природних кристалах був виявлений в першій половині минулого століття, наприклад в сегнетовій солі, в кварці і т.д. [14]. Однак, для інженерних додатків ці кристали малопридатні, оскільки їх електромеханічний зв'язок, тобто зв'язок між їх механічними і електричними властивостями, невеликий. Найбільш широко в технічних додатках застосовується п'єзокераміка типу PZT. Ця кераміка була розроблена в токійському технологічному інституті в 1950-х роках. Різні склади цієї п'єзокераміки (наприклад, PZT-5A і PZT-5H) найбільш поширені в даний час

в техніці. З точки зору застосування в п'єзогенераторах, ці склади застосовуються в основному [15].

Основний внесок в область п'єзоелектрики був зроблений Войгтом В., Кеді В.Г., Хізінгом Р.А., Мезоном В.П., Міндліном Р.Д. і Терстоном Х.Ф. Буде корисно розглянути отримання основних лінійних рівнянь п'єзоефекту. Зв'язок між напругою і деформацією для загального матеріалу описується за допомогою пружних властивостей матеріалу. Але в п'єзоелектричному матеріалі існує додатковий ефект сильного електромеханічного зв'язку, який необхідно враховувати.

Перший закон термодинаміки (принцип збереження енергії) для лінійного п'єзоелектричного континуума представлено рівнянням (1.1):

$$\dot{U} = T_{ij} + \dot{S}_{ij} + E_i \dot{D}_i \quad (1.1)$$

де \dot{U} - щільність енергії, запасеної в п'єзоелектричному континуумі (точка зверху означає диференціювання по часу);

T_{ij} - тензор напруги;

\dot{S}_{ij} - тензор деформації (точка зверху означає диференціювання по часу);

E_i - тензор напруженості електричного поля;

\dot{D}_i - тензор електричного зміщення (точка зверху означає диференціювання по часу).

Щільність електричної ентальпії H визначається виразом (1.2):

$$H = U - E_i D_i \quad (1.2)$$

Продиференціювавши рівняння (1.2) і підставивши (1.1), отримаємо:

$$\dot{H} = T_{ij} \dot{S}_{ij} - \dot{E}_i D_i \quad (1.3)$$

де $H = H(S_{ij}, E_i)$, так що компоненти тензорів напруги і електричного зміщення можна вичислити із щільності електричної ентальпії наступним чином [16]:

$$T_{ij} = \frac{\partial H}{\partial S_{ij}}, \quad D_i = -\frac{\partial H}{\partial E_i} \quad (1.4)$$

Щільність електричної ентальпії для лінійної теорії п'єзоелектрики має вигляд:

$$H = \frac{1}{2} c_{ijkl}^E S_{ij} S_{kl} - e_{kij} E_k S_{ij} - \frac{1}{2} \varepsilon_{ij}^S E_i E_j \quad (1.5)$$

де c_{ijkl}^E , e_{kij} , ε_{ij}^S - пружні, п'єзоелектричні і діелектричні постійні.

Використовуючи рівняння (1.4) та (1.5) разом із співвідношенням

$$\frac{\partial S_{ij}}{\partial S_{ij}} = \delta_{ij}, \text{ отримаємо:}$$

$$T_{ij} = c_{ijkl}^E S_{kl} - e_{kij} E_k \quad (1.6)$$

$$D_i = e_{ikl} S_{kl} + \varepsilon_{ij}^S E_k \quad (1.7)$$

де δ_{ij} - символ Кронекера, який дорівнює 1 при $i = j$ і дорівнює 0 при $i \neq j$.

Це фундаментальні лінійні рівняння для безмежного п'єзоелектричного континууму. Перелічені нижче три пари являють собою альтернативні форми п'єзоелектричних рівнянь. Вони використовуються для рішень при деяких обмежуючих умовах (зазвичай для обмеженого п'єзоелектричного середовища):

$$S_{ij} = s_{ijkl}^E T_{kl} + d_{kij} E_k \quad (1.8)$$

$$D_i = d_{kij} T_{kl} + \varepsilon_{ik}^T E_k \quad (1.9)$$

$$S_{ij} = s_{ijkl}^D T_{kl} + g_{kij} D_k \quad (1.10)$$

$$E_i = -g_{ikl} T_{kl} + \beta_{ik}^T D_k \quad (1.11)$$

$$T_{ij} = c_{ijkl}^D S_{kl} - h_{kij} D_k \quad (1.12)$$

$$E_i = -h_{ikl} S_{kl} + \beta_{ik}^S D_k \quad (1.13)$$

$d_{kij}, g_{kij}, h_{kij}$ - альтернативні п'єзоелектричні сталі;

s_{ijkl}^E, s_{ijkl}^D - сталі пружної податливості;

$\beta_{ik}^T, \beta_{ik}^S$ - сталі діелектричної проникності.

Індекс D означає, що постійні виміряні при постійному електричному зміщенню, а індекс T – при постійній напрузі [17].

Генератори на основі п'єзоелектриків використовують тонкі мембрани або консольні балки з п'єзоелектричних кристалів (рис. 1.5) в якості механізмів перетворювача [18]. Коли кристали піддаються механічній напрузі під дією кінетичної енергії вібрації, завдяки п'єзоелектричному ефекту, виробляється невелика електрична напруга. Ці механізми, як правило, дуже прості з декількома рухомими частинами, і вони мають дуже довгий термін служби [19].

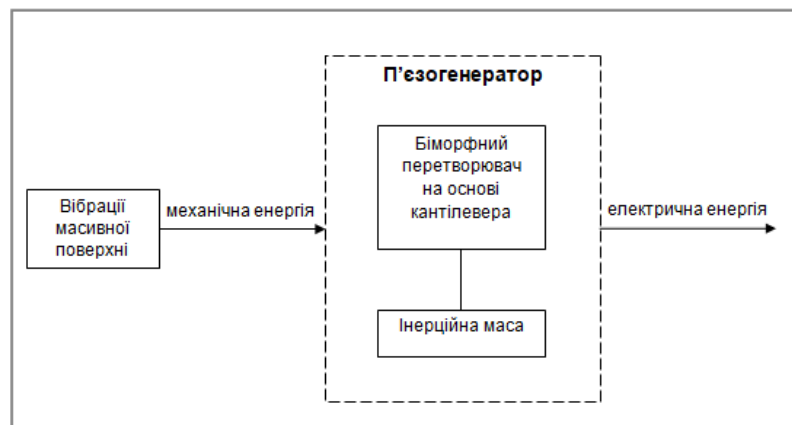


Рис.1.5. Схема принципу роботи п'єзоелектричного віброгенератора

Основними перевагами п'єзоелектричних матеріалів у накопиченні енергії (в порівнянні з двома іншими основними механізмами перетворення) є їх щільність потужності (рис.1.2) і легкість застосування [20]. Також, ще однією перевагою п'єзоелектричних пристроїв, на відміну від електромагнітних, є те, що вони можуть бути виготовлені як в макромасштабі, так і в мікромасштабі.

Електромагнітні генератори використовують електромагнітні сили, для руху вільних електронів в котушці постійного магніту обертача. П'єзоелектричний матеріал, який використовується в якості непровідного матеріалу, не має вільних електронів, тому електрони не можуть вільно

переходити через матеріал [16]. Так як п'єзокераміка не має вільних електронів, але складається з кристалів, які мають багато «постійних» електронів. Ці постійні електрони можуть злегка рухатися під дією зовнішньої сили, тобто з'являється деформація кристалів. Такий невеликий рух електронів змінює стан рівноваги сусідніх матеріалів і створює електрорушійну силу. Ця сила буде штовхати і тягнути електрони на електроди п'єзоелектричного кристала.

Магнітні і п'єзоелектричні генератори працюють подібно, але все-таки є різниця між ними (рис.1.14). Магнітні генератори використовують механічну енергію для зміни магнітного поля. Це змінне поле створює силу для переміщення вільних електронів. А у генераторі п'єзоелектричному, вільні електрони рухаються, змінюючи електричне поле «всередині» кристала.

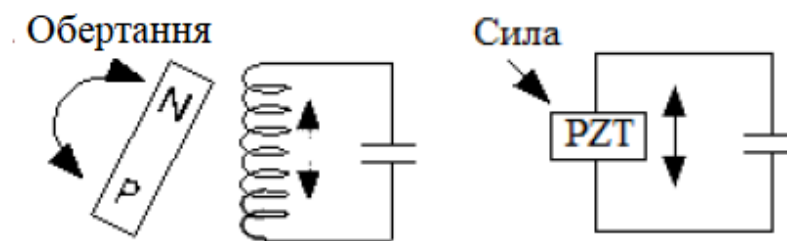


Рис.1.14. Електромагнітний і п'єзоелектричний генератор

Існує декілька конструкцій п'єзоелектричних генераторів для збору енергії (харвестерів) – генератор на основі кантилера (балки), генератор з діафрагмними кріпленнями, гнучка «тарілка», та ін [21].

На рис.1.6 представлена конструкція **п'єзоелектричного віброгенератора у вигляді тришарового кантилевера**, з двома шарами п'єзокераміки та металічною центральною прокладкою. П'єзоеlementи складаються із двох однакових п'єзопластин.

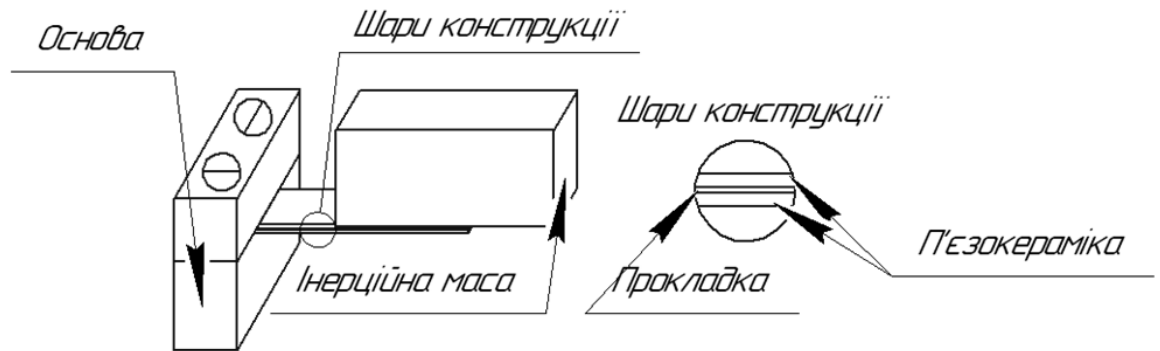


Рис.1.6. Конструкція кантилеверного п'єзоелектричного віброгенератора

П'єзоелектричний генератор з круговими діафрагмними кріпленнями. Такий вид генераторів дуже схожий на конфігурацію генератора кантилеверного типу – рис.1.7. Щоб зміцнити п'єзоелектричну круглу діафрагму, виготовляється тонкий круглий диск з п'єзоелектрика, який потім з'єднується з металічною прокладкою, а потім притискається до краю, так що вібрація краю може забезпечити необхідну вібрацію для п'єзоелектричного матеріалу для збудження. Як і в біморфному кантилеверному генераторі, до центру кругової діафрагми може бути прикріплена інерційна маса, щоб забезпечити напруження в п'єзоелектричному матеріалі. Даний тип генератора працює у режимі 31.



Рис.1.7. П'єзоелектричний віброгенератор з круговими діафрагмними кріпленнями

П'єзоелектричний віброгенератор типу гнучка «тарілка» розроблено для застосування з силовими ударами. Як правило, ці типи харвестерів складаються з двох електричних металевих дисків і порожнистої металеві кінцевий кришки в кожній стороні дисків.

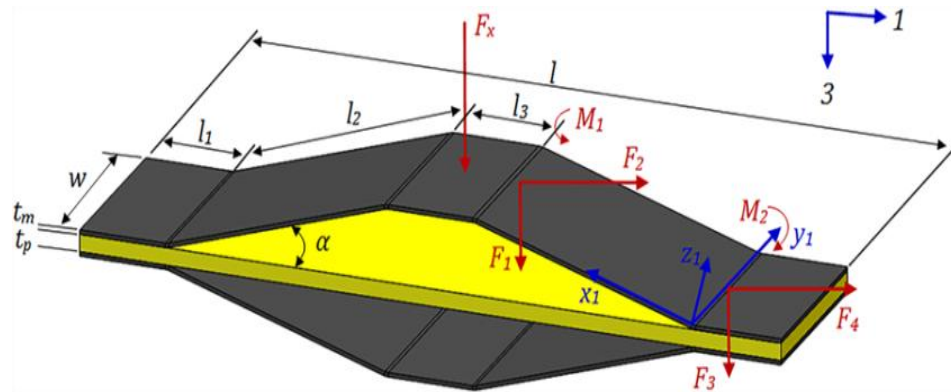


Рис.1.8. П'єзоелектричний віброгенератор типу гнучка «тарілка»

Наявність порожнин дозволяє металевим кінцевим ковпачкам діяти в якості механічного трансформатора для перетворення радіального зміщення п'єзоелектричної кераміки в повздовжній зсув і посилити його і, таким чином, обидва коефіцієнти п'єзоелектричного заряду d_{33} і d_{31} беруть участь у формуванні енергії генератора і значно більше переміщення S може бути отримано на «тарілці». Основним фактором для передачі енергії є постійне п'єзоелектричне поле і постійні п'єзоелектричні напруги. Таким чином, для підвищення вихідної потужності необхідно збільшити множення цих факторів, а також конструкція повинна бути такою, щоб харвестер зміг витримати високі циклічні напруги без руйнування [21].

Найбільше застосовуваною та дослідженою є конструкція кантилевер, для якої отримані схемні [22] та розподілені моделі [24].

Діапазон вихідної потужності п'єзоелектричних віброгенераторів складає від декількох мікроват до декількох сотень мікроват [22], а величина вихідної напруги – до 5 В, що сильно залежить від величини опору навантаження. Це викликає необхідність встановлення подальших електронних пристроїв для стабілізації та перетворення цієї напруги.

1.2. Порівняльний аналіз способів перетворення механічної енергії в електричну

Кожен з трьох основних способів перетворення механічної енергії в електричну (ємнісний, індуктивний, п'єзоелектричний) має свої переваги та недоліки.

Конденсаторний принцип використовує відносний рух двох пластин конденсатора відносно один одного. Цей рух викликає заряджання, що зберігається на пластинах конденсатора, шляхом переміщення через зовнішнє навантаження, виробляючи електричну потужність. Для принципу індуктивного перетворення постійний магніт рухається відносно котушки, викликаючи напругу на котушці. Нарешті, механічне напруження в шарі, виконаному з п'єзоелектричного матеріалу, забезпечує розділення заряду в п'єзоелектричному матеріалі, який перетворюється в напругу між обома поверхнями шару.

У порівнянні з двома іншими принципами, принцип конденсаторного перетворення можна максимально реалізувати в технологіях мікроелектромеханічних систем (MEMS), і існує високий рівень відповідного технологічного ноу-хау. На жаль, ємнісні харвестери вимагають початкової поляризації напруги або заряду. Це можна досягти за допомогою спеціальних матеріалів, які називаються "Електрети", які можуть забезпечити початкову поляризацію, і вони можуть підтримувати їх заряд протягом

декількох років. Електростатичні харвестери страждають високим вихідним імпедансом, обмежуючи досяжний вихідний струм. На відміну від цього, вихідна напруга, як правило, дуже висока ($> 100 \text{ V}$), що створює проблему в дизайні інтерфейсної схеми. Паразитичні ємності в межах структури іноді можуть призвести до зниження ефективності роботи генератора та призвести до замикання або прилипання конденсаторних електродів. Електростатичні генератори до сих пір демонструють найнижчу щільність накопичення енергії.

Індукційний принцип перетворення пропонує добре розроблену техніку з різноманітними пружинними / масовими конфігураціями, які можна використовувати з різними типами матеріалів. Високоєфективні об'ємні магніти і багатовиткова котушка легко доступні. Відносно високий вихідний струм виходить за рахунок низької вихідної напруги ($< 1 \text{ V}$), що вимагає високоєфективних випрямлячів та перетворювачів для підсилення, щоб забезпечити рівень напруги, придатний для постачання загальної електроніки. Проблеми існують при проектуванні пристроїв МЕМС через слабкі властивості планарних магнітів, обмежену кількість оборотів плоских котушок та обмежену амплітуду вібрації. Практична максимальна щільність енергії індуктивних генераторів набагато вище в порівнянні з ємнісними генераторами, але нижче, ніж це досягається п'єзоелектричними генераторами.

Принцип п'єзоелектричного перетворення пропонує найпростіший підхід, оскільки немає необхідності мати складні геометрії та численні додаткові компоненти. Вібрації безпосередньо перетворюються в електрику через електродуговий п'єзоелектричний матеріал. П'єзоелектричні матеріали можна просто наносити, використовуючи тонкі та товсті плівки, отже, він добре підходить для процесів МЕМС. П'єзоелектричні харвестери здатні виробляти відносно високі вихідні напруги, але тільки при низьких

електричних струмах. Через те, що п'єзоелектричні матеріали напружуються безпосередньо, п'єзоелектричні властивості обмежують загальну продуктивність і тривалість життя. Найпоширеніший матеріал цирконат-титаната свинцю (PZT) є дуже крихким і, таким чином, схильний до тріщин, якщо він надмірно напружений. Відповідно з трьох кінетичних механізмів перетворення, п'єзоелектричні генератори пропонують найвищу практичну максимальну щільність накопичення енергії.

Отже, основними перевагами п'єзоелектричних генераторів є:

- легкість застосування;
- високі питомі показники вихідної потужності;
- можливість зміни вихідної напруги підбором геометричних розмірів п'єзоелектричного матеріалу;
- невеликі розміри генератора

1.3. Ефективні параметри п'єзокераміки і монокристалів

Типові властивості п'єзокераміки PZT-5A і PZT-5H можна знайти в різних джерелах в Інтернеті або в літературі. При кімнатній температурі п'єзокераміка PZT-5A має такі параметри:

- $d_{31} = -171 \cdot 10^{-12} \frac{\text{м}}{\text{В}}$ - п'єзоелектрична стала деформації;
- $s_{11}^E = 16,4 \cdot 10^{-12} \frac{\text{м}^2}{\text{Н}}$ - пружна піддатливість при постійній напруженості електричного поля;
- $\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} = 1700$ - діелектрична стала;
- $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$ - електрична стала;

Відповідні сталі для PZT-5Н:

- $d_{31} = -274 \cdot 10^{-12} \frac{M}{B}$ - п'єзоелектрична стала деформації;
- $s_{11}^E = 16,5 \cdot 10^{-12} \frac{M^2}{H}$ - пружна піддатливість при постійній напруженості електричного поля;
- $\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} = 3400$ - діелектрична стала;
- $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{M}$ - електрична стала;

Технологія монокристалів застосовується нещодавно в порівнянні з широко відомими типами п'єзокераміки PZT-5.A і PZT-5H. Літературні дані по монокристалах вельми обмежені.

Таблиця 1.1. Властивості кераміки і монокристалів

	d_{31} , пм/В	s_{11}^E , пм ² /Н	$\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0}$	ρ , кг/м ³
П'єзокераміка				
PZT-5.A	-171	16,4	1700	7750
PZT-5H	-274	16,5	3400	7500
Монокристали				
PMN – PT (30% PT)	-921	52	7800	8040
PMN – PT (33% PT)	-1330	69	8200	8060
PMN – PZT	-2252	127	5000	7850

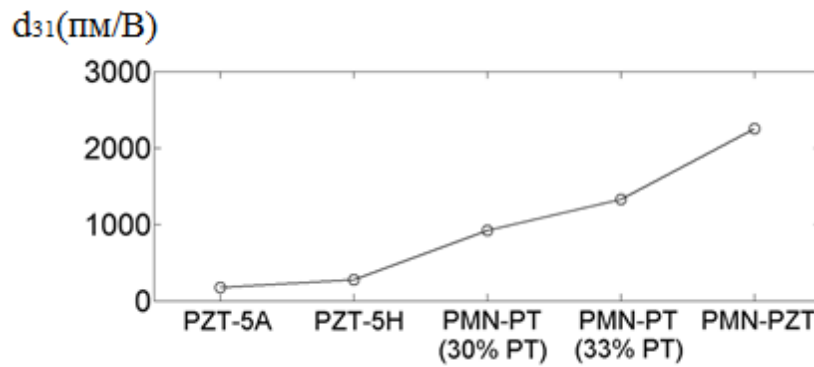


Рис.1.9. Порівняльний графік п'єзомодуля кераміки і монокристалів

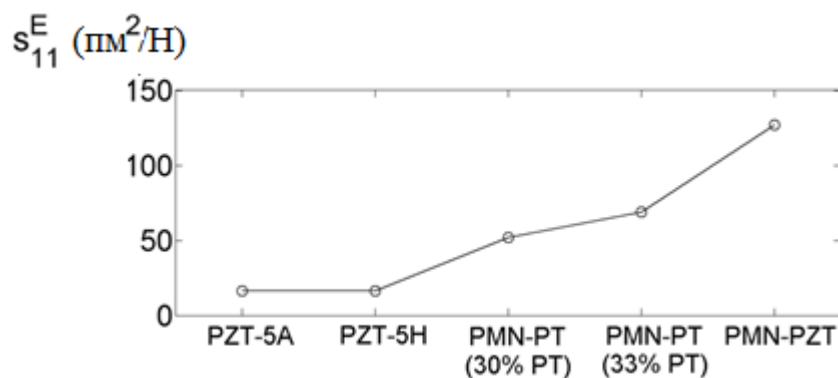


Рис.1.10. Порівняльний графік пружної податливості кераміки і монокристалів

Як видно на рис.1.9, п'єзомодуль зростає більше, ніж на порядок величини від PZT-5A до PMN-PZT. Також видно, що збільшення п'єзомодуля супроводжується збільшенням пружної піддатливості, це видно на рис. 1.10. Пружна податливість від PZT-5A до PMN-PZT зростає на порядок. Діелектричні постійні для монокристалів більше, ніж для кераміки, хоча різниця і не настільки вражаюча, ніж у п'єзоелектричних або пружних констант. Щільності цих п'єзоматеріалів дуже близькі один до одного, як видно з таблиці 1. Важливо також додати, що механічні добротності цих відносно м'яких керамік і монокристалів зазвичай не перевищують величину $Q_m < 100$ [7].

Для плоско - напруженого стану тонкої балки, модуль пружності при постійній напруженості електричного поля виходить з $\bar{c}_{11}^E = \frac{1}{s_{11}^E}$, ефективна п'єзоелектрична стала виходить з $\bar{e}_{31} = \frac{d_{31}}{s_{11}^E}$, і ефективна діелектрична проникність при постійній напруженості електричного поля дається виразом $\bar{\epsilon}_{33}^S = \epsilon_{33}^T - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E}$. Ці параметри обчислюються за даними, приведеними в таблиці 1 і приведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2. Властивості кераміки і монокристалів для плоско-напруженого стану тонкої балки

	\bar{c}_{11}^E , ГПа	\bar{e}_{31} , с/м ²	$\bar{\epsilon}_{33}^S$, нФ/м
П'єзокераміка			
PZT-5.A	-171	16,4	1700
PZT-5H	-274	16,5	3400
Монокристали			
PMN – PT (30% PT)	-921	52	7800
PMN – PT (33% PT)	-1330	69	8200
PMN – PZT	-2252	127	5000

Важливо відмітити, що \bar{e}_{31} представляє собою п'єзоелектричну сталу, яка фігурує в приведеній (для плоско-напруженого стану) фундаментальній системі п'єзоефекта в аналітичній моделі, тобто в модальних електромеханічних коефіцієнтах зв'язку (таблиця 1.2).

Модуль пружності при постійній напруженості електричного поля це просто величина, що зворотна пружної піддатливості показаної на рис.1.11 і приведений на рис.1.12 для цих п'єзоматеріалів.

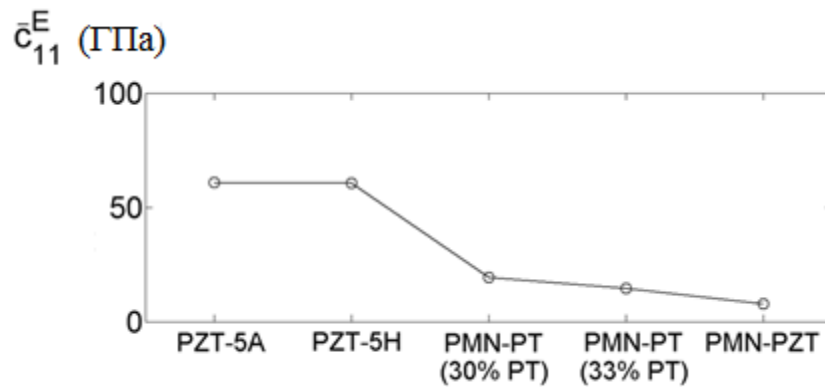


Рис.1.11. Зміна модуля пружності для плоско-напруженого стану для кераміки і монокристалів

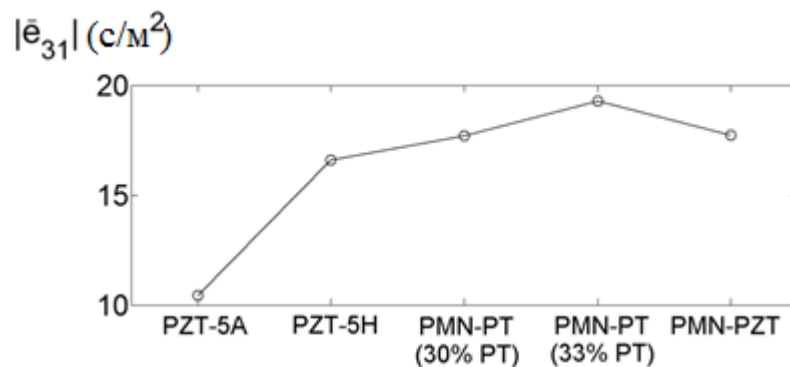


Рис.1.12. Зміна п'єзокерамічної сталої для плоско-напруженого стану для різних типів кераміки і монокристалів

Зрозуміло, що монокристали з великими значеннями постійних d_{31} мають низький модуль пружності. Оскільки п'єзоелектрична стала \bar{e}_{31} представляє собою добуток d_{31} і \bar{c}_{11}^E (які змінюються в протилежних напрямках на рис.1.9 і рис.1.11), то для матеріалів, що розглядаються тут, вона має приблизно однакове значення (рис.13). Наприклад, якщо навіть константа d_{31} для кераміки PMN-PZT більш ніж в 10 разів перевищує п'єзомодуль для кераміки PZT-5A, то її стала \bar{e}_{31} тільки в 1,7 разів більше останньої сталої.

В коефіцієнтах зв'язку фігурує стала \bar{e}_{31} . З цієї причини, дуже високі значення сталої d_{31} монокристалів можуть мати не дуже високу потужність, оскільки їх висока податливість негативно впливає на електромеханічний зв'язок. Серед матеріалів, які було розглянуто, найбільше значення коефіцієнта \bar{e}_{31} має PMN-PT.

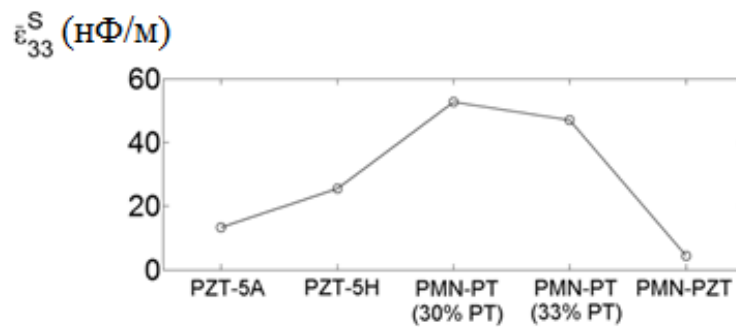


Рис.1.13. Зміна плоско-напруженої проникності для кераміки і монокристалів

Зміна діелектричної проникності при постійній деформації для різних п'єзоматеріалів показаних на рис.1.13. Діелектрична постійна $\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0}$ зростає від PZT-5A до PMN-PT з 33% PT в таблиці 2. Однак, проникність при постійній деформації $\bar{\epsilon}_{33}^S$ зменшується після PMN-PT з 30% PT. Важливо відмітити, що проникність при постійній деформації плоско-напруженої кераміки PMN-PZT нижче, ніж у всіх розглянутих матеріалах (завдяки великому значенню d_{31}) [17].

Висновки до розділу 1

1. Серед видів відновлюваної енергії лише механічна енергія потребує мінімальних фінансових затрат на виготовлення та встановлення утилізуючих пристроїв, вона є постійно діючою, пристрої перетворення енергії з механічної в електричну форму мають максимально довгий термін служби і не створюють екологічних проблем. Питома вага перетворювачів механічної енергії в електричну складає 5% відновлюваної енергетики.

2. Існує три типи перетворення механічної енергії – електромагнітний (індукційний), електростатичний (ємнісний) та п'єзоелектричний. Основними перевагами п'єзоелектричних генераторів є:

- легкість застосування;
- високі питомі показники вихідної потужності;
- можливість зміни вихідної напруги підбором геометричних розмірів п'єзоелектричного матеріалу;
- невеликі розміри генератора.

3. Матеріалом п'єзоелементів віброгенераторів є кераміка PZT-5A і PZT-5H, а основними типами конструкцій п'єзоелектричних віброгенераторів є кантилевер (закріплена з одного кінця багатошарова балка з інерційним вантажем на іншому кінці) та гнучка тарілка. Найбільше застосовуваною та дослідженою є конструкція кантилевер, для якої отримані схемні та розподілені моделі. Діапазон вихідної потужності п'єзоелектричних віброгенераторів складає від декількох мікروات до декількох сотень мікروات, а величина вихідної напруги – до 5 В, що сильно залежить від величини опору навантаження. Це викликає необхідність встановлення подальших електронних пристроїв для стабілізації та перетворення цієї напруги.

РОЗДІЛ II. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СХЕМНОЇ МОДЕЛІ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ВІБРОГЕНЕРАТОРА НАПРУГИ

2.1. Лінійна схемна модель п'єзoeлектричного харвестера

Динамічна модель п'єзoeлектричного харвестера наведена на рис.2.1 [22]. Механічна ланка представлена інерційною масою m , підвішеною на пружині із жорсткістю k_s , що створює резонансну систему. Зовнішня вібрація змушує незакріплений кінець балки гармонічно рухатися, його зміщення відносно положення рівноваги позначене $z(t)$. Механічне демпфування (внаслідок тертя, опору повітря, тощо) представлено коефіцієнтом тертя d . Рух маси використовується для деформування п'єзoeлектричного перетворювача, на поверхнях якого з'являються електричні заряди, що зумовлюють появу електричної напруги $u(t)$. Під дією цієї напруги через навантаження протікає струм $i(t)$, і таким чином відбувається перетворення механічної енергії в електричну. Внаслідок електромеханічного зворотного зв'язку, перетворювач здійснює відновну силу F_e на інерційну масу. Робота, яка проводиться інерційною масою проти відновної сили, перетворюється на електричну енергію.

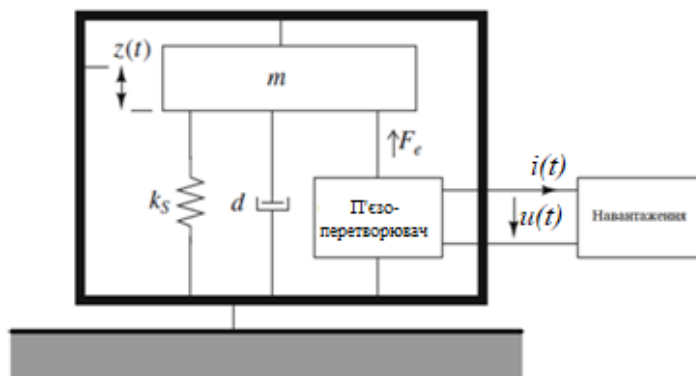


Рис.2.1. Динамічна модель харвестера

Рівняння балансу сил [22]:

$$ma = m\ddot{z} + d\dot{z} + kz + F_e \quad (2.1)$$

де $a = A_m \sin(\omega t)$ – миттєве значення прискорення зовнішньої вібрації/

На рис.2.2 представлений п'єзоелектричний перетворювач харвестера, що використовується на моді коливання 31.

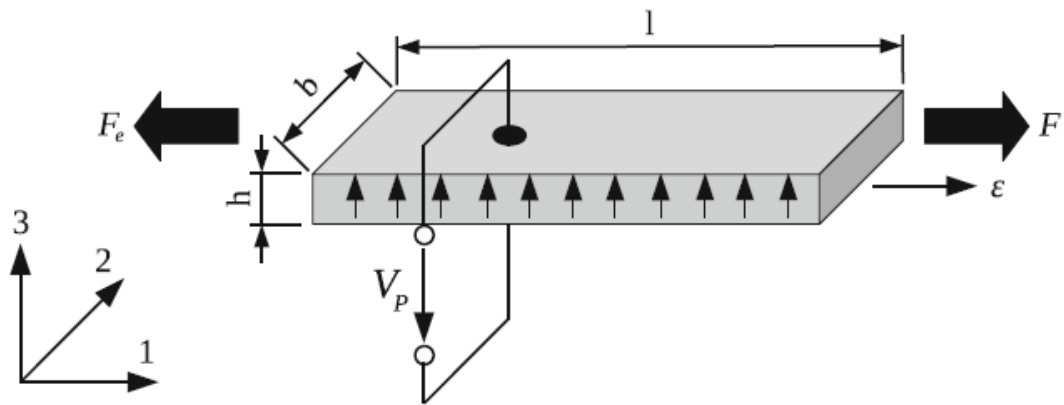


Рис.2.2. П'єзоелектричний перетворювач, що використовується на моді коливання 31

Відновна сила F_e та струм $i(t)$ можуть бути представлені співвідношеннями [22]

$$\begin{cases} F_e = k_p z + nu; \\ i = n\dot{z} - C\dot{u}, \end{cases} \quad (2.2)$$

де k_p - жорсткість п'єзоматеріалу; C - вихідна ємність; n – коефіцієнт електромеханічного зв'язку п'єзоелектричного перетворювача. Ці величини визначаються виразами

$$k_p = \frac{bh}{ls_{11}^E}; \quad C = (\epsilon_{33}^T - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E}) \frac{bl}{h}; \quad n = \frac{d_{31}b}{s_{11}^E} \quad (2.3)$$

де b, l, h – геометричні розміри пластини п'єзоелектричного перетворювача; d_{31} , ϵ_{33}^T , s_{11}^E – п'єзоелектрична стала деформації, пружна піддатливість при

постійній напруженості електричного поля, діелектрична стала відповідно. Їх властивості було описано в розділі 1.2.

Підставивши (2.2) в (2.3), отримаємо лінійну схемну модель п'єзоелектричного харвестера (рис.2.1), яка може бути описана системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} ma = m\ddot{z} + d\dot{z} + kz + nu \\ i = n\dot{z} - C\dot{u} \end{cases} \quad (2.4)$$

де $k = k_p + k_s$ - сума коефіцієнтів жорсткості п'єзоелектричної та механічної структури.

Енергетичний баланс вібраційної системи харвестера може бути отриманий шляхом множення першого рівняння (2.4) на швидкість $\dot{z}(t)$ та інтегруванням в часовій області:

$$\underbrace{\int (ma \dot{z}) dt}_{\text{загальна енергія}} = \underbrace{\frac{1}{2} m \dot{z}^2}_{\text{кінетична енергія}} + \underbrace{\int (d\dot{z}^2) dt}_{\text{пружна енергія}} + \underbrace{\frac{1}{2} k z^2}_{\text{еластична енергія}} + \underbrace{\int (nu\dot{z}) dt}_{\text{електрична енергія}} \quad (2.5)$$

де

$$\int (nu\dot{z}) dt = \frac{1}{2} Cu^2 + \int ui dt \quad (2.6)$$

З виразу (2.5) видно, що енергія, введена в систему, складається з кінетичної енергії, втрат механічного демпфування, енергії пружності та енергії, перетвореної в електричну енергію. Відповідно до (2.6) електрична енергія розподіляється на енергію, яка зберігається на п'єзоелектричній ємності та споживається електричним навантаженням.

2.2. Електромеханічні коефіцієнти зв'язку та загасання

Коефіцієнт зв'язку п'єзоелектричного перетворювача є важливим параметром, оскільки він є мірою для частини введеної механічної енергії, яка перетворюється в електричну енергію. Його підвищення означає, що велику кількість енергії можна збирати з заданої механічної енергії середовища, тобто останній член – електрична енергія, в (2.5) є великим.

Для п'єзоелектричного матеріалу, показаного на рис.2.2, відповідно до стандарту IEEE на п'єзоелектрику квадратний коефіцієнт зв'язку визначається наступним чином:

$$k_{31}^2 = \frac{d_{31}^2}{\varepsilon_{33}^T s_{11}^E} \quad (2.7)$$

k_{31}^2 виключно залежить від п'єзоелектричних властивостей матеріалу. Вимірюваний квадратний коефіцієнт зв'язку k_{31}^2 становить 0,7. Для зв'язування коефіцієнта зчеплення матеріалу k_{31}^2 та узагальненого електромеханічного коефіцієнта зчеплення n , який залежить від геометричних параметрів кантилевера:

$$k_{31}^2 = \frac{n^2}{k_p C} \quad (2.8)$$

Щоб описати загальну структуру харвестера (наприклад, геометрію резонатора) замість властивостей п'єзоелектричного шару, можна використовувати ефективний коефіцієнт зчеплення:

$$k_{eff}^2 = \frac{\omega_{oc}^2 - \omega_{sc}^2}{\omega_{oc}^2} \quad (2.9)$$

ω_{oc} та ω_{sc} позначають кутові резонансні частоти відкритої та короткозамкнутої схеми відповідно.

Ефективний коефіцієнт зв'язку - це зручний параметр, який дозволяє порівнювати різноманітні збірні конструкції за допомогою будь-якого п'єзоелектричного матеріалу. Внаслідок електромеханічного зворотного зв'язку для п'єзоелектричного харвестера існують дві резонансні частоти залежно від електричного навантаження. Фундаментальна резонансна частота визначається для випадку, коли п'єзоелектричні термінали харвестера короткозамкнені:

$$\omega_{sc} = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.10)$$

Антирезонансна частота вища, ніж фундаментальна резонансна частота, і відображається у конфігурації з відкритою схемою:

$$\omega_{oc} = \omega_{sc} \sqrt{1 + k_{eff}^2} \quad (2.11)$$

k означає загальну жорсткість, що складається з механічної структури та п'єзоелектричного матеріалу, тоді як k_{eff}^2 означає квадратний ефективний фактор електромеханічного зчеплення. Як для основної, так і антирезонансної частоти електромеханічне демпфування, яке здійснюється відповідним електричним навантаженням (тобто $R_H = 0$ для основної частоти і $R_H = \infty$ для антирезонансної частоти), дорівнює нулю.

Наступне рівняння корелює коефіцієнт електромеханічного з ефективним фактором електромеханічного зчеплення:

$$k_{eff}^2 = \frac{n^2}{kC} \quad (2.12)$$

2.3. Еквівалентна схема п'єзоелектричного харвестера та оптимізація її параметрів для отримання максимальної вихідної потужності при максимальній напрузі

В усталеному синусоїдному режимі роботи системі рівнянь (2.4) відповідає комплексна схема заміщення (рис.2.3):

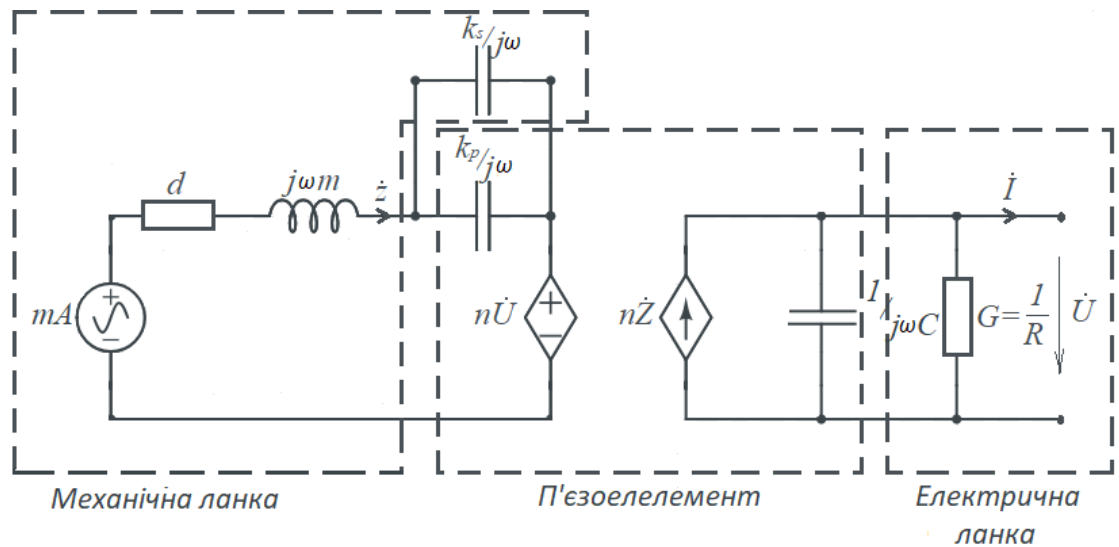


Рис.2.3. Схема заміщення п'єзоелектричного харвестера

де $A = A_m / \sqrt{2}$ – діюче значення прискорення зовнішньої вібрації;

\dot{Z} – комплекс діючого значення швидкості руху незакріпленого кінця балки;

\dot{U}, \dot{I} – комплекси діючих значень вихідної напруги та струму, що за наявності активного опору навантаження номіналом R зв'язані співвідношенням.

$$\dot{I} = \dot{U} / R = G\dot{U},$$

де G – провідність навантаження.

В схемі елемент d можна розглядати як внутрішній опір ідеального джерела $m\dot{A}$, в інших елементах, окрім опору навантаження, активна

потужність дорівнює нулю. Тому їх у сукупності можна розглядати як реактивний чотириполіусник, включений між реальним джерелом, що складається з послідовного з'єднання елементів mA й d , та навантаженням. З теорії чотириполіусників відомо [28], що при забезпеченні узгодженого режиму такого чотириполіусника вихідна потужність досягатиме максимуму, що дорівнює чверті потужності короткого замикання реального джерела. У даному випадку це максимальне значення

$$P_{MAX} = \frac{(mA)^2}{4d} = \frac{(mA_m)^2}{8d} \quad (2.13)$$

збігається з наведеним у монографії [22].

Після підстановки (2.25) в квадрат модуля коефіцієнта передачі за напругою, знайденого з використанням формули (2.21), остаточно отримаємо:

$$\begin{aligned} K_U^2 &= \frac{n^2}{4d^2(G^2 + \omega^2 C^2)} = \frac{n^2}{4d^2\{n^2 / d[n^2 / 2d - \sqrt{(n^2 / 2d)^2 - \omega^2 C^2}]\}} = \\ &= \frac{1}{4d[n^2 / 2d - \sqrt{(n^2 / 2d)^2 - \omega^2 C^2}]} = \frac{0.5}{n^2 - \sqrt{n^4 - 4d^2 \omega^2 C^2}}. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Величина модуля коефіцієнта передачі за напругою в узгодженому режимі залежить як від параметрів механічної ланки d та ω , так і параметрів п'єзоелектричної пластини n, C . При варіюванні розмірами п'єзоелектрика змінюватиметься і його жорсткість $k_P = bh / ls_{11}^E$. При цьому важливо витримати умову $m - k / \omega^2 > 0$, що забезпечує можливість виконання першого рівняння системи (2.16). Підстановка значень складників дає перше обмеження на максимізацію виразу (2.26):

$$bh / l < s_{11}^E (m\omega^2 - k_S). \quad (2.27)$$

Другим обмеженням є умова (2.24) додатного дискримінанта рівняння (2.22), яка після підстановки значень $n = d_{31}b / s_{11}^E; C = \left(\varepsilon_{33}^T - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E} \right) \frac{bl}{h}$ [23]

набуває вигляду:

$$\frac{bh}{l} > \frac{2(s_{11}^E)^2 \omega d}{d_{31}^2} \left(\varepsilon_{33}^T - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E} \right). \quad (2.28)$$

2.4. Формулювання та розв'язок оптимізаційної задачі

Якщо вібрації масивної поверхні зосереджені на одній частоті і мають синусоїдальний характер, то у якості математичної моделі для вихідної електричної потужності виступає рівняння (2.20). Віброгенератор працює в узгодженому режимі завдяки виконанню умов (2.16), що може бути здійснене в автоматичному режимі електронною схемою, що розглядається в наступному розділі.

Отже, необхідно провести математичну оптимізацію. Параметри, які необхідно оптимізувати наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Параметри оптимізації

Величина	Пояснення величини
l , мм	Довжина пластини
h , мм	Висота пластини
b , мм	Ширина пластини

В якості п'єзокераміки обрано матеріал PZT-5Н з густиною 9000 кг/м^3 . Відповідні сталі для PZT-5Н:

- $d_{31} = -274 \cdot 10^{-12} \frac{\text{м}}{\text{В}}$ - п'єзоелектрична стала деформації;
- $s_{11}^E = 16,5 \cdot 10^{-12} \frac{\text{м}^2}{\text{Н}}$ - пружна піддатливість при постійній напруженості електричного поля;

- $\frac{\varepsilon_{33}^T}{\varepsilon_0} = 3400$ - діелектрична стала;

- електрична стала

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$$

Матеріали групи PZT володіють високими частотами та великою чутливістю. Також дані матеріали є комерційно доступними. Слід зазначити, що п'єзокераміка не виступає у якості провідника. Заряд збирається та транспортується до навантаження тільки тоді, коли поверхня покрита провідним електродом. Частини поверхні, які не покриті електродом діють як механічний елемент, проте не сприяють виробленню електричної енергії.

Отже, задача оптимізації формулюється наступним чином:

при заданих параметрах механічної частини A, m, d, k_S, ω , та обмеженнях

$$\begin{aligned} b_{MIN} \leq b \leq b_{MAX}; h_{MIN} \leq h \leq h_{MAX}; l_{MIN} \leq l \leq l_{MAX}; blh \leq V; \\ \frac{2(s_{11}^E)^2 \omega d}{d_{31}^2} \left(\varepsilon_{33}^T - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E} \right) < \frac{bh}{l} < s_{11}^E (m\omega^2 - k_S) \end{aligned} \quad (2.29)$$

знайти значення розмірів b, l, h пластини з відомого п'єзокерамічного матеріалу, що визначають параметри електричної частини

$$C = \left(\varepsilon_{33}^T - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E} \right) \frac{bl}{h}; n = \frac{d_{31}}{s_{11}^E} b; k_P = bh / ls_{11}^E$$

та максимізувати квадрат коефіцієнта передачі за напругою в узгодженому режимі

$$K_U^2 = \frac{0.5}{n^2 - \sqrt{n^4 - 4d^2 \omega^2 C^2}}.$$

Задача оптимізації була розв'язана у середовищі Matlab за допомогою методу послідовного квадратичного програмування - Sequential Quadratic

Programming (SQP) для вирішення нелінійних обмежених задач оптимізації. Детальніше TUT у додатках 1 та 2.

В якості прототипу обраний п'єзоелектричний харвестер [29], що також працює в узгодженому режимі, схемна модель якого була верифікована програмою COMSOL Multiphysics. У таблиці 2.2 наведені порівняльні результати розв'язку оптимізаційної задачі.

Таблиця 2.2. Розв'язок оптимізаційної задачі

Величина	Пояснення величини	Прототип	Оптимізована модель
l , мм	Довжина пластини	50	37.005
h , мм	Висота пластини	0.5	0.1992
b , мм	Ширина пластини	5	1.9847
V , мм ³	Об'єм пластини	125	14.630
P , мкВт	Вихідна потужність	323	322.984
U , В	Вихідна напруга	1.82	6.8896
R , кОм	Опір навантаження	10.3	146.962

В результаті забезпечення оптимальних геометричних розмірів п'єзоелектричної пластини (рис. 2.4) вихідна напруга збільшилася майже в 4 рази, порівняно з прототипом, до 7 В.

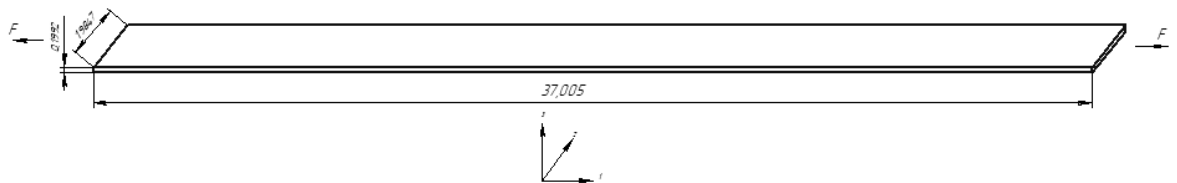


Рис.2.4. П'єзоелектрична пластина віброгенератора напруги

Якщо вважати, що к.к.д. п'єзоелектричного харвестера досягає максимального значення 0.5, а на відкритому транзисторі електронної схеми забезпечення узгодженого режиму падає 0.5 В та знехтувати динамічними втратами, коефіцієнт корисної дії прототипа складе

$$\eta_0 = \eta_X \eta_E = 0.5 \times \frac{1.82 - 0.5}{1.82} = 36.3\%,$$

в той час як у оптимізованої моделі

$$\eta_1 = 0.5 \times \frac{6.8896 - 0.5}{6.8896} = 46.4\%.$$

Таким чином, підвищення вихідної напруги п'єзоелектричного харвестера дозволяє збільшити к.к.д. системи перетворення енергії на 10.1%.

Висновки до розділу 2

1. В результаті застосування теорії чотириполіосників до дослідження схемної моделі п'єзоелектричного віброгенератора напруги типу кантилевер отримані нові умови (2.16) забезпечення його узгодженого режиму, при яких вихідна потужність досягає максимуму.
2. Сформульована нова оптимізаційна задача розрахунку геометричних розмірів п'єзоелектричної пластини, що максимізують вихідну напругу п'єзоелектричного віброгенератора в узгодженого режиму та встановлені нові обмеження (2.27), (2.28) цієї задачі.
3. Методом послідовного квадратичного програмування в середовищі Matlab були оптимізовані геометричні розміри п'єзоелектричної пластини віброгенератора напруги. У порівнянні з прототипом при тому ж значенні вихідної потужності вихідна напруга збільшена в 3.78 рази, що забезпечило підвищення к.к.д. системи перетворення енергії на 10.1%.

РОЗДІЛ III. ЕЛЕКТРИЧНІ СХЕМИ ДЛЯ ВИХІДНОЇ ЧАСТИНИ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ВІБРОГЕНЕРАТОРА

Вихідні напруга та струм п'єзоелектричного віброгенератора при навантаженні у вигляді резистора мають синусоїдну форму, в той час як сенсори та інформаційні пристрої потребують постійної напруги живлення. Крім того, в розглянутій в попередньому розділі схемі не існує жодного елемента зберігання, де зібраний заряд може накопичуватися для подальшого використання. Таким чином, навантаження у вигляді резистора непридатне для реального застосування перетвореної механічної енергії. Це викликає необхідність встановлення подальших електронних пристроїв для перетворення синусоїдної напруги п'єзоелектричного віброгенератора.

3.1. Двонапівперіодний випрямляч з конденсатором

Двонапівперіодний випрямляч є простим пристроєм для перетворення вихідної синусоїдної напруги п'єзоелектричного віброгенератора в напругу постійного струму, яка може бути використана для постачання електричної енергії. На рис.3.1 зображено п'єзоелектричний харвестер з інтерфейсом двонапівперіодного випрямляча і навантаженням, що складається з буферного конденсатора і паралельного резистора навантаження.

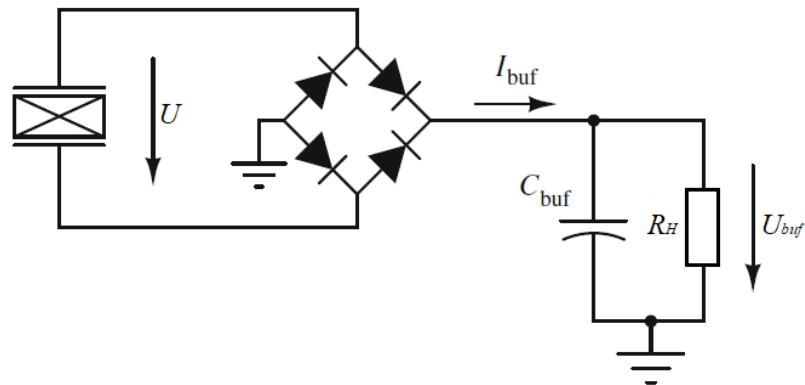


Рис.3.1. П'єзоелектричний харвестер з двонапівперіодним випрямлячем, що складається з діодів, буферного конденсатора C_{buf} і резистор R_H

Буферний конденсатор C_{buf} вважається дуже великим, так що напруга U_{buf} може бути постійною протягом декількох періодів збудження. Діоди повинні бути ідеальними, тобто вони не показують падіння напруги. На рис.3.2 наведені типові сигнали вихідної напруги харвестера U , а також рух сейсмічної маси z та струму, що входить в буферний конденсатор I_{buf} . Діоди проводять тільки якщо U досягає U_{buf} ; U падає пропорційно масовій швидкості z доки до $-U_{buf}$ не досягнуто відповідно до другого рівняння (2.2) при $I = 0$. Протягом часу, коли $-U_{buf} \leq U \leq U_{buf}$, діоди блокують і не відбувається передача енергії, що означає, що п'єзоелектричний харвестер запускається у відкритій схемі.

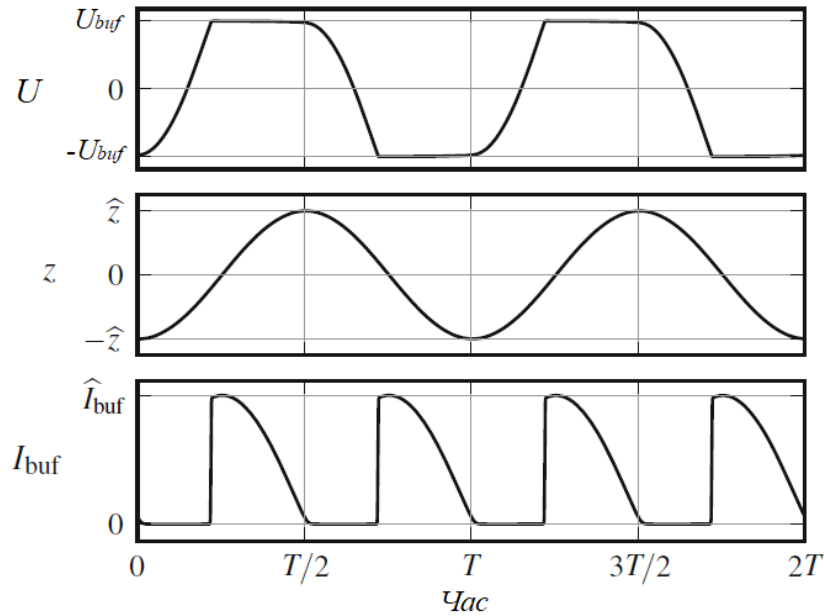


Рис.3.2. Типові графіки вихідної напруги п'єзоелектричного харвестера U , руху маси z та струму, що входить в буферний конденсатор, I_{buf}

Заряд, накопичений на буферному конденсаторі протягом двох екстремумів масового зміщення, може бути розрахований інтегралом по струму I_{buf} . У стаціонарному стані цей заряд дорівнює заряду, видаленому резистором навантаження. Таким чином, баланс заряду може бути записаний як

$$\int_0^{T/2} I_{buf} dt = \frac{U_{buf}}{R_H} \frac{T}{2} \quad (3.1)$$

де $\frac{T}{2} = \frac{\pi}{\omega}$ - показує один напівперіод збудження. Якщо струм I_{buf} , що входить у буферний конденсатор, замінюється другим виразом (2.2), то (3.1) можна переписати як

$$\int_0^{T/2} (n\dot{z} - C\dot{U}) dt = \frac{U_{buf}}{R_H} \frac{\pi}{\omega} \quad (3.2)$$

що призводить до виразу для напруги буферного конденсатора:

$$U_{buf} = \frac{R_H n}{R_H C \omega + \frac{\pi}{2}} \omega \hat{z} \quad (3.3)$$

Використовуючи вираз (3.3), потужність може бути розрахована як:

$$P = \frac{U_{buf}^2}{R_H} = \frac{R_H n^2}{\left(R_H C \omega + \frac{\pi}{2}\right)^2} \omega^2 \hat{z}^2 \quad (3.4)$$

Якщо харвестер привести в антирезонанс, то результуюча вихідна напруга U невелика, і це ж саме стосується сили зворотного зв'язку GU . Таким чином, зміщення кантилевера не сильно залежить від навантаження, і, отже, його можна вважати постійним. У результаті вихідна потужність при антирезонансі може бути записана як:

$$P_{AP} := P \quad (3.5)$$

Під припущенням, що харвестер керується резонансом, тобто рушійна сила $m\ddot{A}$ і швидкість \dot{z} знаходяться в фазі, амплітуда масового зсуву \hat{z} може бути розрахована за допомогою вираження енергетичного балансу, наведеного в (2.5). Оскільки кінетична енергія в моменти $t_1 = T/2$ і $t_2 = 3T/2$ (див. рис 3.2), а зміна пружної енергії між тими самими моментами дорівнює нулю, то забезпечена енергія являє собою суму механічних втрат і збірна енергія:

$$\int_0^{T/2} (m\dot{a}\dot{z}) dt = \int_0^{T/2} d\dot{z}^2 dt + \frac{U_{buf}^2}{R_H} \frac{T}{2} \quad (3.6)$$

З (3.6), амплітуда зміщення маси може бути обчислена в припущенні, що зміщення залишається синусоїдальним, що є хорошим наближенням для структур з низькими втратами видимості:

$$\hat{z} = \frac{m\hat{a}}{d\omega + \frac{2R_H\omega n^2}{\left(R_H C\omega + \frac{\pi}{2}\right)^2}} \quad (3.7)$$

де \hat{a} позначає амплітуду зовнішнього збудження $\ddot{y}(t)$. Використовуючи (3.4) та (3.7), зібрана потужність при резонансі може бути виражена як:

$$P_{рез} = \frac{R_H n^2}{\left(R_H C\omega + \frac{\pi}{2}\right)^2} \left(\frac{m\hat{a}}{d + \frac{2R_H n^2}{\left(R_H C\omega + \frac{\pi}{2}\right)^2}} \right) \quad (3.8)$$

Для антирезонансного збудження оптимальний опір навантаження, при якому витягується максимальна потужність, може бути розрахована наступним чином:

$$R_H^{AP} = \frac{\pi}{2C\omega} \quad (3.9)$$

Отже, максимальна потужність на антирезонансі становить:

$$P_{AP} = \frac{n^2}{2\pi C} \omega \hat{z}^2 \quad (3.10)$$

Коли для екстремумів досліджується вираз для вихідної потужності (3.8), стає очевидним, що існує два рішення для R_H :

$$R_H^{рез} = R_H^{AP} = \frac{\pi}{2C\omega} \quad (3.11)$$

і

$$R_{H,1,2}^{рез} = \frac{2n^2 - \pi C d \omega \pm 2n\sqrt{n^2 - \pi C d \omega}}{2C^2 d \omega^2} \quad (3.12)$$

Отже, існує два відповідних значення максимальної потужності:

$$P_{\max}^{pez} = \frac{n^2}{2\pi C\omega} \frac{(m\hat{a})^2}{\left(d + \frac{n^2}{\pi C\omega}\right)^2} \quad (3.13)$$

i

$$P_{\max}^{pez} = P_{\lim} = \frac{(m\hat{a})^2}{8d} \quad (3.14)$$

Оскільки (3.13) залежить від коефіцієнта зв'язку, варто розрахувати оптимальне значення коефіцієнта зв'язку, для якого перше можливе рішення отриманої потужності стає максимальним [22]:

$$n^2 = \frac{d(\pi + 2CR_H\omega)^2}{8R_H} \quad (3.15)$$

Поєднання (3.11) та (3.15) дає граничний вираз між двома режимами, який більше не є функцією R_H :

$$n_{ep}^2 = \pi d\omega C \quad (3.16)$$

3.2. Система синхронного вилучення електричного заряду

Рис.3.3 ілюструє систему збору енергії за допомогою синхронного вилучення електричного заряду (СВЕЗ). Вона складається з діодного випрямляча, трьох вимикачів S_1 , S_2 , S_3 та індуктора L . Діодний випрямляч інвертує негативний напівперіод синусоїдного входної напруги до позитивної полярності. Перемикачі з індуктивністю L використовуються для тимчасового зберігання енергії, витягнутої з п'єзоелектричного харвестера перед тим як вона вийде у буферний конденсатор. Використовуючи цей проміжний крок, інтерфейс СВЕЗ здатний повністю витягати енергію, що зберігається на п'єзоелектричній ємності C протягом кожного циклу.

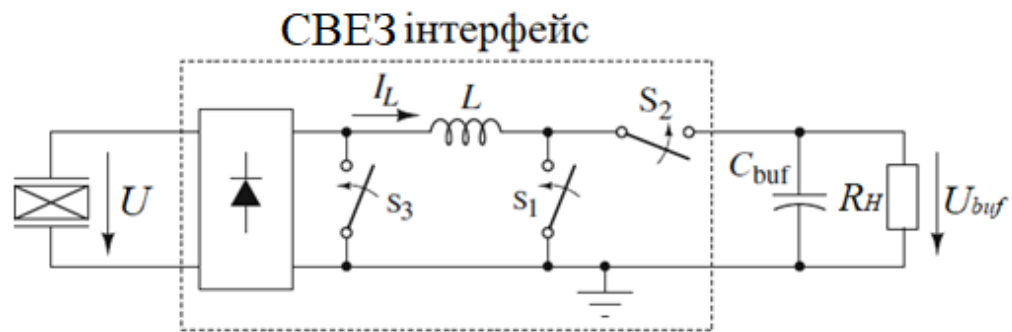


Рис.3.4. П'єзоелектричний харвестер з інтерфейсом та навантаженням

На рис.3.5 показані відповідні сигнали вихідної напруги п'єзоелектричного харвестера, зсуву маси, струму індуктивності та цифрових сигналів, що контролюють перемикачі. Інтерфейс СВЕЗ працює лише в певні моменти протягом коротких інтервалів часу порівняно з періодом збудження, де потужність витягується з п'єзоелектричного харвестера. Ці моменти спрацьовують за максимумами та мінімумами масового переміщення, які в фазі з максимумами та мінімумами напруги між терміналами п'єзоелектричного харвестера.

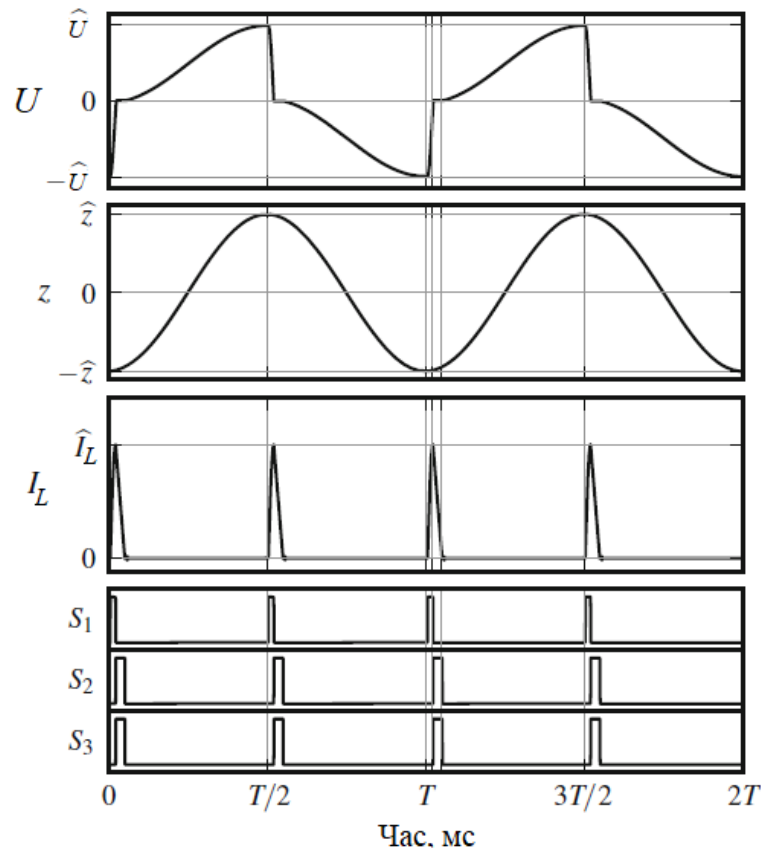


Рис.3.5. Типові графіки вихідної напруги п'єзоелектричного харвестера U , зміщення маси \hat{z} , струму, що протікає через індуктор, I_L , та цифрові сигнали, що контролюють перемикачі

Крім цих циклів витягнення енергії, інтерфейс СВЕЗ підтримує харвестер у відкритій схемі, що означає, що струм не входить в інтерфейс СВЕЗ.

Коли напруга харвестера U досягає максимуму \hat{U} , енергія, накопичена в п'єзоелектричній ємності, також є максимальною. У цю мить енергію миттєво переносять на індуктор, вмикаючи перемикач S_1 , що призводить до швидкого розряду U . Коли U перетинає 0 В, S_1 вимикається, а S_2 та S_3 увімкнені, випускаючи енергію у буферний конденсатор. Після того, як процес передачі енергії завершиться, інтерфейс СВЕЗ вимкнений, знову повертаючись у нескінченний вхідний опір.

Тому передбачається, що всередині СВЕЗ-інтерфейсу немає втрат. Оскільки струм не протікає протягом більшої частини часу, то друге рівняння (2.2) можна інтегрувати, використовуючи $i = 0$, що приводить до вираження для амплітуди вихідної напруги харвестера:

$$\hat{U} = 2 \frac{n}{C} \hat{z} \quad (3.17)$$

Енергія, що зберігається на п'єзоелектричній ємності, виділяється один раз повністю протягом половини періоду збудження. Отже, використовуючи (3.17), середня витягнута потужність може бути розрахована як:

$$P_{BCEZ} = \frac{\frac{1}{2} C \hat{U}^2}{\frac{T}{2}} = 2 \frac{n^2 \omega}{\pi C} \hat{z}^2 \quad (3.18)$$

Подібно до навантаження випрямляча, оскільки зміщення залишається приблизно постійним для збудження в антирезонансному режимі, відповідний вираз для витягнутої потужності визначається

$$P_{BCEZ}^{AP} = P_{BCEZ} \quad (3.19)$$

Енергетичний баланс використовується для отримання амплітуди зміщення \hat{z} , коли п'єзоелектричний харвестер рухається при резонансі. Оскільки видобування енергії відбувається двічі за період збудження, енергетичний баланс після півперіоду враховується:

$$\int_0^{T/2} m a \dot{z} dt = \int_0^{T/2} d\dot{z}^2 dt + 2 \frac{n^2}{C} \hat{z}^2 \quad (3.20)$$

Знову ж таки, даний баланс енергії означає, що кінетична і пружна енергія зникають. Припускаючи, що зміщення залишається синусоїдальним, амплітуда переміщення може бути розрахована як:

$$\hat{z} = \frac{m \hat{a}}{d\omega + \frac{4n^2}{\pi C}} \quad (3.21)$$

Потужність для збудження в резонансі може бути записана у вигляді:

$$P_{BCE3}^P = 2 \frac{n^2 \omega}{\pi C} \left(\frac{m\hat{a}}{d\omega + \frac{4n^2}{\pi C}} \right)^2 \quad (3.22)$$

Для того, щоб знайти оптимальний коефіцієнт зв'язку, (3.22) слід досліджувати для екстремумів. Виявляється, що максимальна потужність

$$P_{BCE3, \max} = \frac{(m\hat{a})^2}{8d} \quad (3.23)$$

може бути досягнута для

$$\Gamma_{BCE3}^2 = \frac{\pi d \omega C}{4} \quad (3.24)$$

3.3. Електронна схема СВЕЗ на основі MOSFET транзисторів

3.3.1. Побудова силової частини

На рис.3.5 показано, як реалізується силова частина системи СВЕЗ з використанням MOSFET транзисторів. П'єзоелектричний харвестер, індуктор і навантаження - це зовнішні компоненти, безпосередньо з'єднані зі схемою, все інше інтегроване в схему. Індуктивність індуктора повинна перебувати в діапазоні мГн, оскільки значну частину енергії потрібно передавати протягом кожного циклу передачі, тому його не можна вбудувати в мікросхему. Те саме стосується і навантажувального конденсатора, який повинен мати ємність у діапазоні мкФ.

Схема складається з негативного перетворювача напруги (НПП), силових вимикачів M_{S1} , M_{S2} і M_{S3} та схеми керування перемикачем, де генеруються керуючі сигнали для вимикачів. Обвідний канал забезпечує провідний шлях між п'єзоелектричним перетворювачем і буферним конденсатором, якщо напруга U_{buf} занадто мала для подачі схеми керування перемикачем. Після того, як U_{buf} досягне певного рівня, тригер запуску дає сигнал, щоб вимкнути обхід і почати нормальну роботу (рис.3.7).

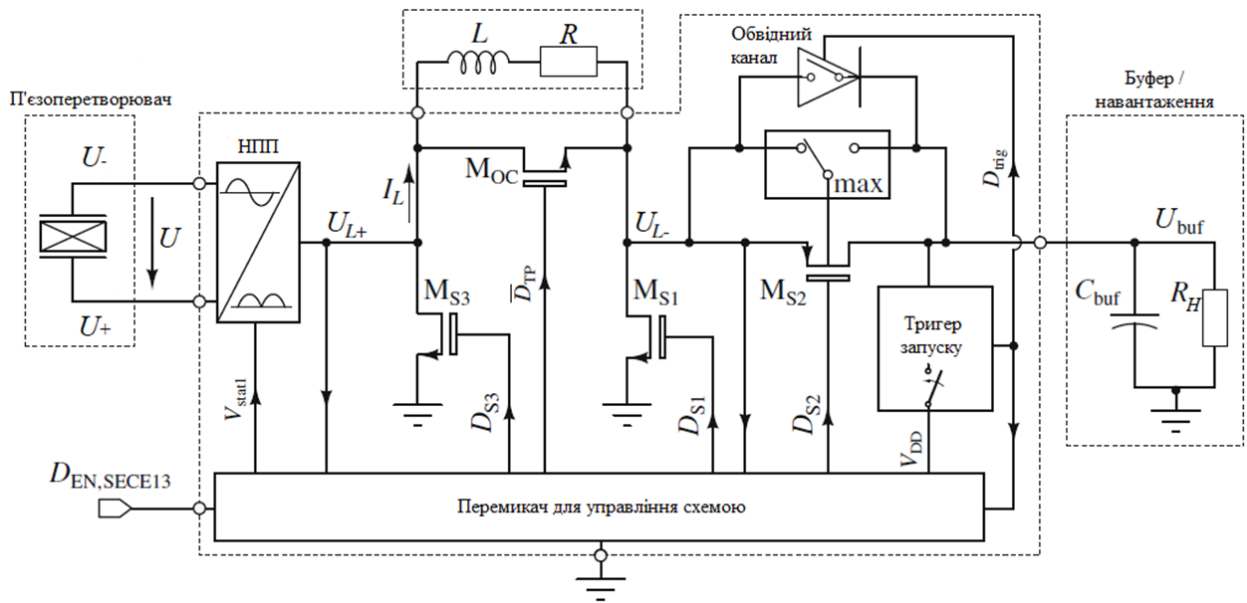


Рис.3.6. Силова частина системи СВЕЗ

Високопровідні транзистори з товстою оксидним шаром, що допускають 18 В (20 В) на свої виводах, були використані для реалізації всіх транзисторів, які контактують з напругою п'єзоелектричного харвестера, тобто вимикачі потужності, транзистори негативних перетворювачів напруги (НПН) та шунтуючі (з обвідними каналами) транзистори. На відміну від стандартних 3,3 В транзисторів, що мають мінімальну довжину 0,35 мкм, транзистори високої напруги 18 В мають мінімальну довжину 3,5 і 2,5 мкм для транзисторів n-каналу та р-каналу, відповідно. Для того, щоб отримати порівнювані опори, високовольтні пристрої мають більшу площу, ніж стандартні пристрої, і вони страждають від вищої ємності затвора. Оскільки джерело ємності повинно бути заряджено та розряджено протягом кожного циклу комутації, це неминуче призводить до більш високої динамічної втрати потужності. Окрім того, займана площа є більшою, а значить, дорожчою.

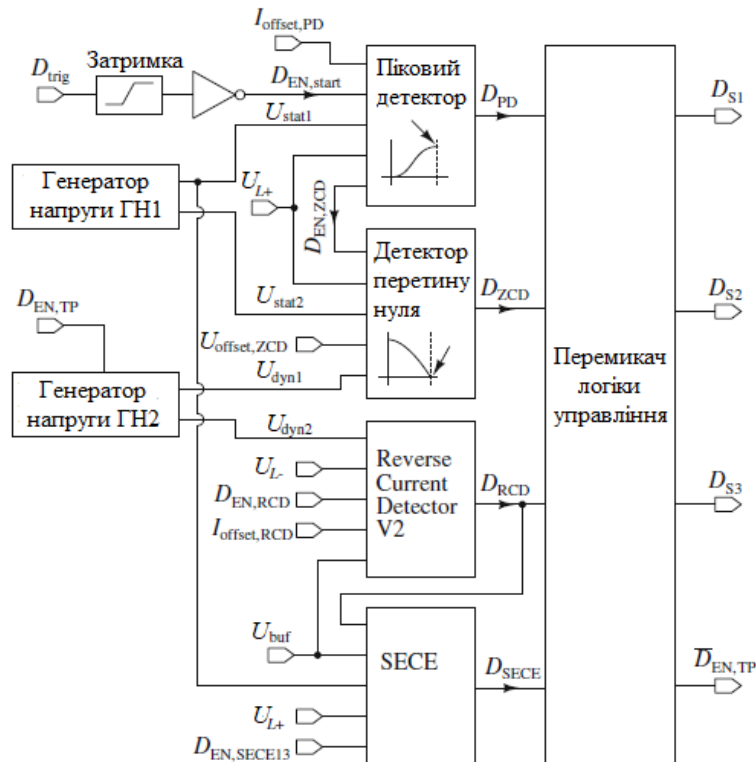


Рис.3.7. Перемикання схеми управління мікросхеми PSCE

3.3.2. Перемикач схеми управління

На рис.3.7 зображено блок-схему схеми керування перемикачем, об'єднуючи блоки таким чином, щоб керуючі сигнали для силових вимикачів були сформовані належним чином.

Тому в основному використовуються стандартні 3.3 В транзистори. Для цих пристроїв максимально допустима напруга на вході та напруга джерела живлення становить 3,6 В (5 В). З огляду на це, оскільки подача замикання схеми керування перемикачем, V_{DD} , безпосередньо підключена до буферного конденсатора, напруга буферного конденсатора обмежується 5 В. Додатковий зовнішній навантажувальний резистор необхідний для обмеження напруги буферного конденсатора до верхньої межі, тому що немає схеми захисту від напруги, реалізованої в схемі.

Відповідна логіка показана окремо на рис.3.8. Деякі RS-тригери та мультиплексори поєднують вихідні сигнали детекторів з метою генерування керуючих сигналів для силових вимикачів, як це пояснено в наступному. Сигнал тригера запуску D_{trig} ініціалізує піковий детектор для належної роботи безпосередньо після запуску. Під час фази відкритої схеми піковий детектор чекає пік виправленої п'єзоелектричної напруги U_{L+} , тоді як детектор нульового перетину та детектор зворотного струму відключені. D_{S1} та D_{S3} низькі, вмикаючи NMOS-комутатори (n-канал MOSFET) M_{S1} і M_{S3} . Перемикач рівнів D_{S2} до максимуму (U_{L+} , U_{buf}) для правильного вимкнення PMOS (р-канал MOSFET) M_{S2} . Коли виявляється пік U_{L+} , вихідний рівень селектора SECE вирішує, чи активовано SECE13 або SECE1323.

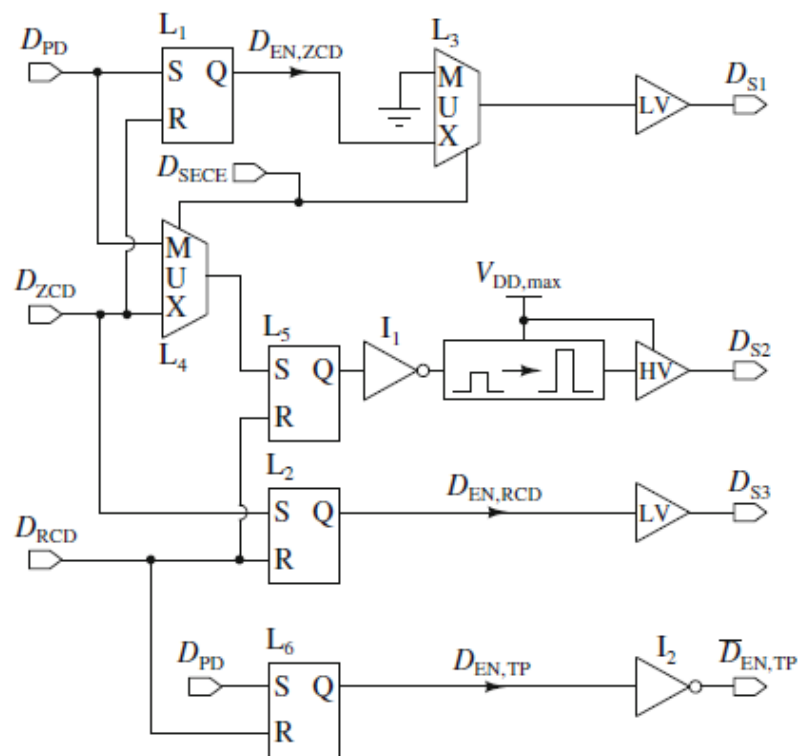


Рис.3.8. Перемикання управління логічного блоку PSCE схеми

Коли збудження п'єзоелектричного харвестера низьке, так що $U_{L+} < 2U_{\text{buf}}$ тримає, селектор СВЕЗ виводить логічний високий сигнал ($D_{\text{SECE}} = U_{\text{buf}}$). Таким чином, мультиплексори L_3 і L_4 подають через нижчі вхідні

сигнали, що приводить до конфігурації SECE13. Це означає, що коли виявляється пік U_{L+} , D_{SI} встановлюється високо, запускаючи передачу енергії з п'єзоелектричного харвестера в індуктор, ввімкнувши M_{SI} . У той же час активізовано детектор нульового перетину, який зараз очікує, що U_{L+} досягне 0В. У такому разі детектор нульового перетину видає короткий імпульс, скидає вихід L_1 на GND , вимикаючи M_{SI} та детектор нульового перетину. У той же час, L_2 встановлює свій вихід на високий рівень, змушуючи D_{S3} виконувати висхідний край, а D_{S2} виконувати падіння краю, включивши M_{S2} і M_{S3} . Таким чином, енергія, що зберігається на індуктивності, випускається в буферний конденсатор. В той же час, детектор зворотного струму активується, щоб контролювати падіння напруги через M_{S2} . Коли струм, що входить до буферного конденсатора, починає отримувати негативне значення, падіння напруги також стає негативним, викликаючи імпульс D_{RCD} , і таким чином вимикаючи M_{S2} і M_{S3} . У той момент передача енергії з п'єзоелектричного харвестера в буферний конденсатор закінчилася, а піковий детектор знову чекає на новий пік U_{L+} .

Якщо U_{L+} перевищує $2U_{buf}$ під час фази змикання, D_{SECE} підтягується низько, активуючи SECE1323. У цьому випадку мультиплексори L_2 і L_3 подаються через верхні входні сигнали, в результаті чого D_{SI} постійно низький. Коли виявляється пік U_{L+} , RS-тригер L_5 виводить його на високий рівень, що приводить до низького рівня D_{S2} . У той же час, $D_{EN, TP}$ встановлюється високо і $\underline{D}_{EN, TP}$ встановлюється низько, деактивує транзистор M_{OC} і активізує ГН2. Крім того, детектор нульового перетину активовано шляхом встановлення $D_{EN, ZCD}$ високого рівня. Коли виявляється нульовий перетин U_{L+} , детектор нульового перетину вимкнено, а детектор зворотного струму активовано шляхом встановлення $D_{EN, RCD}$ високим за допомогою RS-тригера L_2 . Таким чином, D_{S3} встановлений також високо, ініціюючи другу фазу передачі (D_{S2} залишається низьким). Коли виявляється зворотний струм, D_{S3} витягується низько через L_2 , а D_{S2} встановлюється високо через L_5 та

інвертор I_I , закінчуючи процес передавання та дезактивації детектору зворотного струму та ГН2. У той же час, $D_{EN, TP}$ встановлюється високо, включивши M_{OC} і тим самим залучаючи скасування коливань, а D_{SECE} встановлюється високо, щоб скинути схему керування перемикачем. Для того, щоб порівняти техніку SECE1323 та SECE13 за тих самих умов, техніку SECE13 можна примусити зовні, встановивши $D_{EN, SECE13}$ високий. У цьому випадку D_{SECE} постійно високий [22].

Висновки до розділу 3

1. Навантаження у вигляді резистора непридатне для реального застосування перетвореної п'єзоелектричним віброгенератором механічної енергії. Це викликає необхідність встановлення подальших електронних пристроїв для перетворення синусоїдної напруги п'єзоелектричного віброгенератора в постійну.
2. Суттєве підвищення енергоефективності п'єзоелектричного віброгенератора напруги досягається у системі синхронного вилучення електричного заряду (СВЕЗ), яка потребує для свого функціонування діодного випрямляча та транзисторів, що працюють у ключовому режимі.
3. З урахуванням діапазонів вихідних напруг та струмів п'єзоелектричного віброгенератора електричної схеми на базі MOSFET-транзисторів є найкращим варіантом для реалізації системи СВЕЗ.

РОЗДІЛ IV. НАПРЯМИ ПОДАЛЬШОГО ВДОСКОНАЛЕННЯ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ НАПРУГИ

Підвищення ефективності п'єзоелектричних віброгенераторів напруги можливо різними способами: використання більш ефективних п'єзоелектричних матеріалів з використанням різних п'єзоелектричних конфігурацій (наприклад, режим 31 або режим 33), використання різних механічних структур та використання адаптивних енергозберігаючих пристроїв [23].

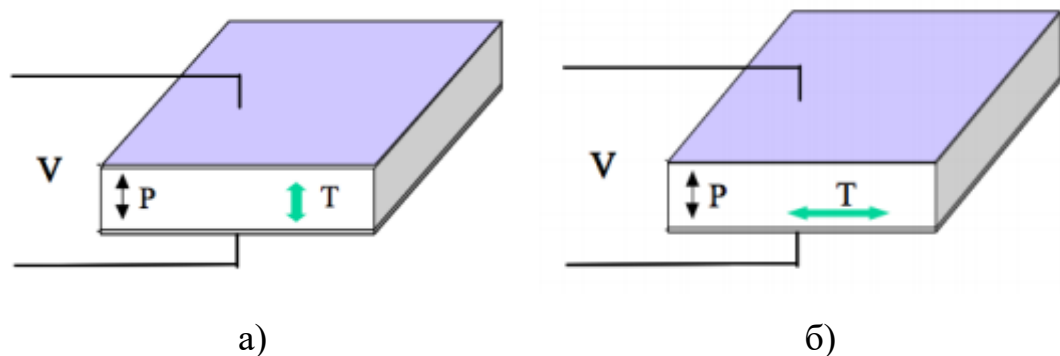


Рис.4.1. П'єзоелектричний матеріал в режимі роботи а) 33 та б) 31

Як правило, в п'єзоелектричних матеріалах існують два основних режими: поздовжній режим (мода 33) або поперечний режим (мода 31) з відповідною резонансною частотою [21]. На рис.4.1. зображено два режими, в яких зазвичай використовується п'єзоелектричний матеріал. Вісі x , y та z позначені напрямками 1, 2 і 3 відповідно.

У поздовжньому режимі напрямом механічного напруження T є паралельним напрямком електричного поляризації або P , з відповідною резонансною частотою – тобто це означає, що напруження і деформація діють в 3 напрямі, а в поперечному режимі напрямом механічного напруження T перпендикулярний електричному або напрям поляризації P , з відповідною резонансною частотою - це означає, що напруження діє в

напрямі 3 (тобто матеріал поляризований в 3-му напрямі), а деформація діє в напрямі 1. Іншими словами, коли напруга застосовується до п'єзоелектричного елемента у поперечному режимі, вона стискається у напрямку осі z , а напруга позитивна, в той час як у поперечному режимі напруга стискається вздовж осі x і напруга є негативною [29]. Дослідження перетворення механічної енергії в електричну [21] показали, що повздовжній режим (33) в 3-5 разів показує кращу генерацію потужності, ніж поперечний режим (31). Проте, недоліком повздовжнього режиму є жорсткість виготовлення. Окрім того, коефіцієнт ефективності режиму 33 більший ніж режиму 31 (таблиця 4.1):

Таблиця 4.1. Порівняльна таблиця коефіцієнта ефективності в режимі
31 та 33

Коефіцієнт ефективності	PZT-5H
k_{31}^2 , режим 31	0.26
k_{33}^2 , режим 33	0.83

Також, використання п'єзоелектричних енергозберігаючих пристроїв з багатошаровою структурою також є потенційним методом для збільшення вихідної потужності. Song в роботі [25] порівнював п'єзоелектричні харвестери з одним шаром, двома шарами і п'ятьма шарами. Було стверджено, що вихідна потужність генераторів зменшилася зі збільшенням кількості шарів. Однак їх експериментальні результати не були підтверджені теорією.

Zhu [26] порівнював вихідну потужність одношарових, двошарових та трьохшарових п'єзоелектричних харвестерів з однаковою загальною товщиною п'єзокерамічної пластини. В ході моделювання та експериментів було виявлено, що приєднувачі п'єзоелектричної енергії з багатошаровими

структурами збільшували вихідну потужність максимально на 40%, коли всі пари п'єзоелектрики були паралельно з'єднані.

На рис.4.2 показані порівняння поперечного перетину одношарового та багатошарового біоморфного п'єзоелектричного генератора. У першому випадку, шари п'єзокераміки одношарового та багатошарового генератора мають однакову загальну товщину, d . Припускаючи, що кожен шар п'єзокераміки у багатошаровому генераторі має однакову товщину, для пристрою з n шарами, товщина кожного шару п'єзокераміки становить d / n , як показано на рис.4.2. б).

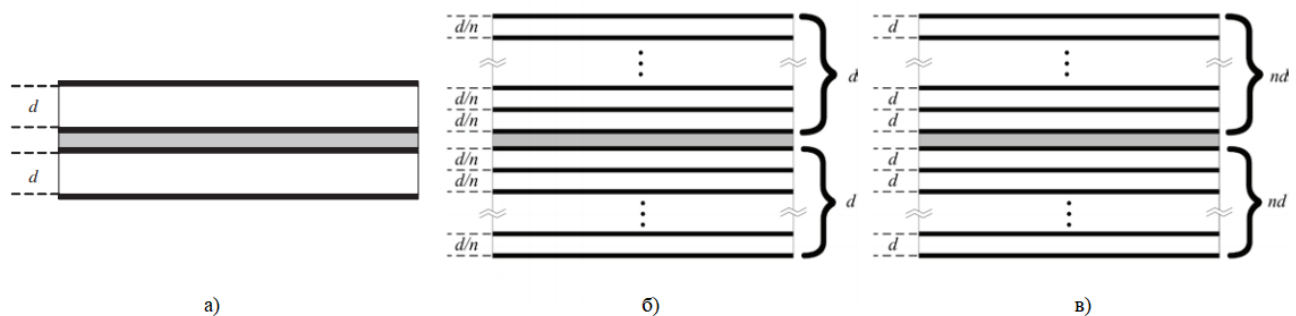


Рис 4.2. Генератор а) з одним шаром, б) багатошаровий (варіант 1), в) багатошаровий (варіант 2)

У другому варіанті товщина кожного шару п'єзокераміки однакова в одношарових і багатошарових генераторах, як d . Для пристрою з n шарами загальна товщина всіх шарів п'єзокераміки у багатошаровому генераторі nd , як показано на рис.4.2 в).

На рис.4.3 показані з'єднання багатошарових п'єзоелектричних генераторів, як паралельно, так і послідовно. Різні способи з'єднання можуть призвести до різних ємностей пристрою і, таким чином, до різних оптимальних опорів навантаження. Крім того, генерований електричний

заряд має різний розподіл, коли PZT шари пов'язані різним чином, що впливає на вихідну потужність генератора.

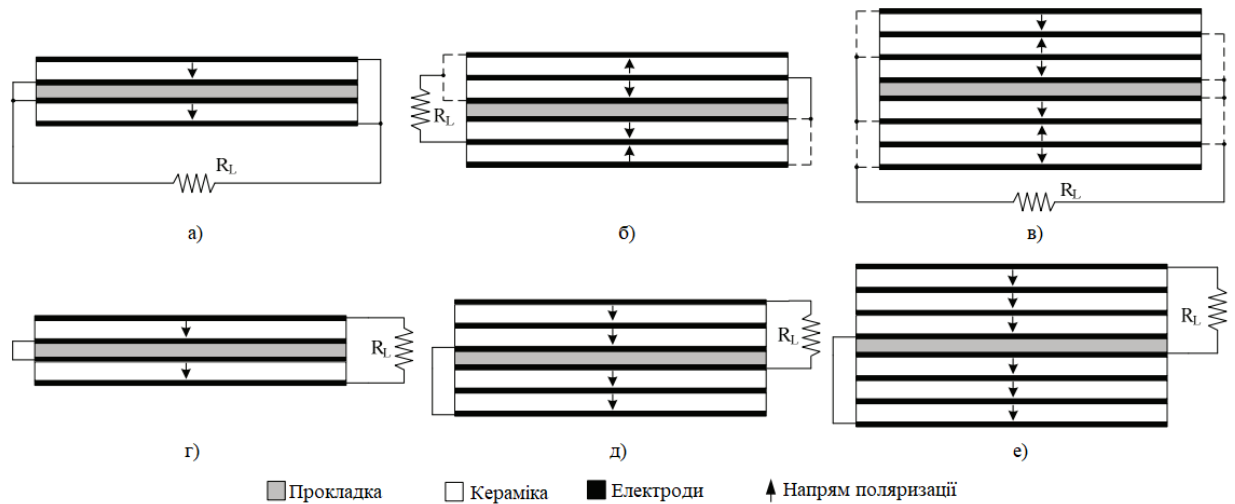


Рис.4.3. З'єднання шарів п'єзокераміки:

паралельне а) одношарова конструкція, б) двошарова конструкція, в) тришарова конструкція
 послідовне г) одношарова конструкція, д) двошарова конструкція, е) тришарова конструкція

Згідно дослідженням [23], де порівнювалися одношарові, двошарові і тришарові генератори з однаковою резонансною частотою та вібрацією, виявлено, що вихідна потужність збільшується з кількістю шарів п'єзокераміки, за винятком випадків паралельного зв'язку, де двошаровий генератор має вищу вихідну потужність, ніж тришаровий (таблиця 4.2).

РОЗРИВ

Таблиця 4.2. Порівняльна таблиця отримання вихідної потужності

	Паралельне з'єднання		Послідовне з'єднання	
	Випадок 1	Випадок 2	Випадок 1	Випадок 2
1-шарова конструкція	1	1	1	1
2-шарова конструкція	1.37	2.22	1.17	3.42

3-шарова конструкція	1.18	4.56	1.4	6.63
-------------------------	------	------	-----	------

У більшості випадків п'єзоелектричний генератор з послідовним з'єднанням має вищу вихідну потужність. Крім того, оптимальний опір навантаження обернено пропорційно потужності пристрою (таблиця 4.3):

Таблиця 4.3. Порівняльна таблиця отримання опору навантаження

	Паралельне з'єднання		Послідовне з'єднання	
	Випадок 1	Випадок 2	Випадок 1	Випадок 2
1-шарова конструкція	1	1	4	4
2-шарова конструкція	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	4	8
3-шарова конструкція	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{3}$	4	12

Напруга відкритого контуру пропорційна ефективній товщині між двома основними електродами, що підключаються до електричного навантаження (таблиця 4.4):

Таблиця 4.4. Порівняльна таблиця отримання вихідної напруги

	Паралельне з'єднання		Послідовне з'єднання	
	Випадок 1	Випадок 2	Випадок 1	Випадок 2
1-шарова конструкція	1	1	2	2
2-шарова конструкція	$\frac{1}{2}$	1	2	4
3-шарова конструкція	$\frac{1}{3}$	1	2	6

Висновки до розділу 4

1. Основними напрямками подальшого підвищення енергоефективності п'єзоелектричного генератора напруги є використання більш ефективних п'єзоелектричних матеріалів з застосуванням різних п'єзоелектричних конфігурацій (наприклад, режим 31 або режим 33), використання різних механічних структур та використання адаптивних енергозберігаючих пристроїв.
2. Найкращий спосіб збільшення вихідної потужності вібраційних п'єзоелектричних харвестерів - це використання багат шарових структур. Згідно результатів моделювання [23] очевидно, що вихідна потужність п'єзоелектричного генератора може бути покращена за допомогою багат шарової структури незалежно від того, як пов'язані шари п'єзокераміки. Оптимальна стійкість до навантаження при паралельному з'єднанні знижується, тоді як напруга з відкритою схемою вища, коли послідовно з'єднані шари п'єзокераміки.

РОЗДІЛ V. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Вступ. Стартап як форма малого ризикового (венчурного) підприємництва впродовж останнього десятиліття набула широкого розповсюдження у світі через зниження бар'єрів входу в ринок (із появою Інтернету як інструменту комунікацій та збуту стало простіше знаходити споживачів та інвесторів, займатись пошуком ресурсів, перетинати кордони між ринками різних країн), і вважається однією із наріжних складових інноваційної економіки, оскільки за рахунок мобільності, гнучкості та великої кількості стартап-проектів загальна маса інноваційних ідей зростає. Розроблення та виведення стартап-проекту на ринок передбачає здійснення низки кроків, в межах яких визначають ринкові перспективи проекту, графік та принципи організації виробництва, фінансовий аналіз та аналіз ризиків і заходи з просування пропозиції для інвесторів.

Метою розділу є формування інноваційного мислення, підприємницького духу та формування здатностей щодо оцінювання ринкових перспектив і можливостей комерціалізації основних науково-технічних розробок, сформованих у попередній частині магістерської дисертації у вигляді розроблення концепції стартап-проекту в умовах висококонкурентної ринкової економіки глобалізаційних процесів.

Завдання розділу полягає в маркетинговому аналізі перспектив реалізації запропонованих магістрантом науково-технічних рішень та пропозицій, оцінювання можливостей їх ринкового впровадження.

Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології). Цілісне уявлення про зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів [27, с.4-7].

Таблиця 5.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Електрична плата харвестера з вихідною електричною напругою 25В	Живлення портативних бездротових систем	Заміна звичайної батарейки АА
		Використання супутньої розсіяної енергії вібрацій – енергія яка не шкодить навколишньому середовищу
		Можливість довготривалого використання

Технологічний аудит ідеї проекту. Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових (таблиця 5.2):

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/доробити?
- чи доступні такі технології авторам проекту [27, с.8].

Таблиця 5.2. Технологічна здійсненність ідеї проекту

Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Електрична плата харвестера з вихідною електричною напругою 5-10 В	Електрична схема пристрою буде виготовлена на основі MOSFET транзисторів	Технологія наявна	Технологія доступна

Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Проведення аналізу попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (таблиця 5.3) [27, с.9].

Таблиця 5.3. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	5
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	2000 – 5000 грн
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Відсутні
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відсутні
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	20%
Висновок: на сьогоднішній день, ринок є привабливим для входження за попереднім оцінюванням.		

Потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формування орієнтовного переліку вимог до товару для кожної групи (таблиця 5.4) [27, с.9].

Таблиця 5.4. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Живити портативні пристрої без використання звичайних батарейок	Інженери, розробники, приватні підприємства з безпроводними системами моніторингу	Якість, точність та вартість.	- до продукції – точність вироблення вихідної напруги; -до компанії-постачальника – встановлення адекватних ринкових цін на купівлю продукції

Аналіз ринкового середовища [27, с.10].:

Таблиця 5.5. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Відсутність попиту	Відсутність інтересу у можливих покупців	Використання контекстної реклами
2	Конкуренція	Велика кількість аналогічних плат на ринку	Зменшення вартості, збільшення якості пристрою

Таблиця 5.6. Фактори можливостей

Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
Використання супутньої розсіяної енергії вібрацій	Даний вид енергії не шкодить навколишньому середовищу	Популяризація використання альтернативи звичайним батареям
Довготривале використання	Строк служби до 10 ⁸ циклів	Популяризація використання альтернативи звичайним батареям

Аналіз конкуренції (таблиця 5.7) [27, с.11]:

Таблиця 5.7. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Якість пристрою	Висока точність показника вихідної напруги
2	Вартість пристрою	Зменшення ціни згідно ринкових

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (таблиця 8) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін.

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення. Наприклад: зниження доходів потенційних споживачів – фактор загрози, на основі якого можна зробити прогноз щодо посилення значущості цінового фактору при виборі товару та відповідно, – цінової конкуренції (а це вже – ринкова загроза) [27, с.12].

Таблиця 5.8. SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: <ul style="list-style-type: none"> • вартість пристрою; • технологія виготовлення 	Слабкі сторони: <ul style="list-style-type: none"> • малопотужна система
Можливості: <ul style="list-style-type: none"> • заміна звичайної батарейки АА; • Використання супутньої розсіяної енергії вібрацій; • Довготривале використання 	Загрози: <ul style="list-style-type: none"> • відсутність попиту • конкуренція

Розроблення ринкової стратегії проекту. Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (таблиця 5.9) [27, с.12].

Таблиця 5.9. Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Підприємства з безпроводними системами моніторингу	Є готовність прийняти продукт	Не можливо встановити	Велика	Вихід в сегмент непростий через наявність великою конкурентності

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформулювати базову стратегію розвитку (таблиця 5.10) [27, с.13].

Таблиця 5.20. Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
Стратегія спеціалізації	Зосередженість на ЦА - підприємства з безпроводними системами моніторингу	Популяризація використання альтернативи звичайним батарейкам	Стратегія диференціації

Вибір стратегії конкурентної поведінки (таблиця 5.11) [27, с.13]:

Таблиця 5.31. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
Ні	Спочатку забирати існуючих споживачів у конкурентів, після – шукати нових.	Ні, не буде	Стратегія виклику лідера

Далі розробляється стратегія позиціонування (таблиця 5.12). що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект [27, с.14].

Таблиця 5.12. Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
Необхідно, щоб пристрій давав на виході точні показники напруги	Стратегія диференціації	Використання альтернативи звичайним батареям	<ol style="list-style-type: none"> 1. використання супутньої розсіяної енергії 2. використання MOSFET транзисторів 3. точні вихідні показники

Розроблення маркетингової програми стартап-проекту. Першим кроком є формування *маркетингової концепції товару*, який отримає споживач. Для цього у таблиці 5.13 потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару [27, с.14].

Таблиця 5.13. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
Живити портативні пристрої без використання звичайних батарейок	<ul style="list-style-type: none"> • використання супутньої розсіяної енергії • використання MOSFET транзисторів • точні вихідні показники 	Менший об'єм харвестера та більше значення вихідної напруги

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне

визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субституту, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (таблиця

Аналіз проводиться експертним методом [27, с.15].

Таблиця 5.14. Визначення меж встановлення ціни

Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
2500-10000 грн	2000 – 7000 грн	Не обмежені	2500 – 6000 грн

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (таблиця 5.15) [27, с.15].

Таблиця 5.15. Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Порівняння декількох представників на ринку	Інтернет ресурси, залучена система закупівлі	Довести до клієнта про можливості нового продукту	Пропаганда товару

Висновки до розділу 5

Наявна ринкова комерціалізація проекту, так як на ринку є попит на дану продукцію. Адже на сьогоднішній день все більше технологій направлені на використання відновлюваної енергії. Є перспектива впровадження на певний сегмент ринку (підприємства з безпроводними системами моніторингу). Отже, можна зробити висновок, що імплементація проекту є доцільною.

ВИСНОВКИ

В ході виконання магістерської дисертації досягнуті такі результати:

1. На основі аналізу науково-технічної літератури з розгляду способів генерації електричної енергії встановлено, що основними перевагами п'єзоелектричних генераторів є високі питомі показники вихідної потужності та можливість зміни вихідної напруги підбором геометричних розмірів п'єзоелектричного матеріалу, а їх основною конструкцією є багатошарова кантилеверна балка з інерційним вантажем.
2. В результаті застосування теорії чотириполісників до дослідження схемної моделі п'єзоелектричного віброгенератора напруги типу кантилевер отримані нові умови забезпечення його узгодженого режиму, при яких вихідна потужність досягає максимуму.
3. Сформульована нова оптимізаційна задача розрахунку геометричних розмірів п'єзоелектричної пластини, що максимізують вихідну напругу п'єзоелектричного віброгенератора в узгодженого режиму та встановлені нові обмеження цієї задачі.
4. Методом послідовного квадратичного програмування в середовищі Matlab були оптимізовані геометричні розміри п'єзоелектричної пластини віброгенератора напруги. У порівнянні з прототипом при тому ж значенні вихідної потужності вихідна напруга збільшена в 3.78 рази, що забезпечило підвищення к.к.д. системи перетворення енергії на 10.1%.
5. Суттєве підвищення енергоефективності п'єзоелектричного віброгенератора напруги досягається при побудові його вихідної ланки у вигляді системи синхронного вилучення електричного заряду, яка реалізується на базі MOSFET транзисторів.
6. Основними напрямками подальшого підвищення енергоефективності п'єзоелектричних віброгенераторів напруги є використання більш ефективних п'єзоелектричних матеріалів із

застосуванням різних п'єзоелектричних конфігурацій (наприклад, режим 31 або режим 33), використання різних механічних структур та використання адаптивних енергозберігаючих пристроїв.

7. Проведена розробка стартап-проекту виготовлення п'єзоелектричних віброгенераторів показала наявність ринкової комерціалізації проекту, перспективи впровадження на певний сегмент ринку (підприємства з безпроводними системами моніторингу), на підставі чого зроблено висновок, що імплементація проекту є доцільною.

8. За матеріалами магістерської дисертації опубліковано дві доповіді на міжнародній та українській конференціях молодих вчених, а отримані результати дисертації впроваджено в ТзОВ «ТЕЗІС СПЕЦПРОЕКТ», що підтверджено актом впровадження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. П'єзогенератори. Пристрій і принцип дії. Застосування і особливості [Електронний ресурс] // ЕЛЕКТРОСАМ.РУ. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://electrosam.ru/glavnaja/jelektrooborudovanie/jelektropitanie/pezogeneratory>
2. Небезпечні відходи: чому не можна викидати батарейки? [Електронний ресурс] // Rodovid.me. – 2013. – Режим доступу до ресурсу: https://rodovid.me/razdelnyi_sbor_musora/opasnye-othody-pochemu-nelzya-vybrasyvat-batareyki.html.
3. Farid Ullah Khan, Izhar (2015) Stan suchasnogo zboru akustychnoi energii [State of the art in acoustic energy harvesting]. Journal of Micromechanics and Microengineering (electronic journal), vol. 25, no. 2, pp. 3. Available at: <http://iopscience.iop.org/journal/0960-1317>
4. Erturk A., Inman D. J. Piezoelectric Energy Harvesting. N.-Y.: Wiley, 2011. – 15-22
5. Генерація електроенергії [Електронний ресурс] // Вікіпедія - вільна енциклопедія. – 2012. – Режим доступу до ресурсу: https://ru.wikipedia.org/wiki/Генерация_электроэнергии
6. Roundy, S., Wright, P., and Rabaey, J., Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks, Kluwer, Academic, Boston, MA. 2004.
7. Jeon, Y.B., Sood, R., Jeong, J.H., and Kim, S., MEMS power generator with transverse mode thin film PZT. Sensors & Actuators A, 122, 2005. P 16–22.
8. Поняття енергії. Основні види енергії [Електронний ресурс] // msd.com.ua – Режим доступу до ресурсу: <http://msd.com.ua/osnovy-energoberezeniya/ponyatie-energii-osnovnye-vidy-energii/>
9. Процес перетворення енергії в електричних машинах [Електронний ресурс] // Школа для електрика – Режим доступу до ресурсу:

<http://electricalschool.info/spravochnik/maschiny/1127-process-preobrazovanija-jenergii-v.html>.

10. Метрологія і електрорадіовимірювання в телекомунікаційних системах: Підручник для ВНЗ. Нефедов В. І., Під ред. Нефедова В.І. - М.: Вища школа., 2001.

11. Принцип дії і конструктивні особливості магнітоелектричних вимірювальних перетворювачів і електростатичних вимірювальних пристроїв "Кафедра метрології та стандартизації" / . – Мінськ, 2008. – 16 с.

12. Резин В.Т., Кострикін А.М. Метрологія та вимірювання. Генераторні вимірювальні перетворювачі. Методичний посібник. Мн., БГУІР, 2004.

13. Lippmann, G., Principe de la conservation de l'electricité, Annales de chimie et de physique, 24, 1881. p 145–178.

14. Voigt, W., Lehrbuch der Kristallphysik, Teubner, Leipzig, 1910

15. Cook-Chennault, K.A., Thambi, N., and Sastry, A.M., Powering MEMS portable devices – a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with emphasis on piezoelectric energy harvesting systems., Smart Materials and Structures, 17, 043001., 2008

16. Tiersten, H.F., Linear Piezoelectric Plate Vibrations, Plenum Press, New York, 1969

17. Erturk, A., Inman, D.J., Piezoelectric Energy Harvesting, 2011.

18. Віктор Нікіфоров. Біморфні п'єзоелектричні елементи: актюатори і датчики (Електронний ресурс) / Віктор Нікіфоров, Віталій Климашин, Олексій Сафронов // Ринок мікроелектроніки – Режим доступу до ресурсу: http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/03_04/stat_46.htm

19. Cook-Chennault K.A. Powering MEMS portable devices a review of nonregenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems / Cook-Chennault K.A., Thambi N., 179 Sastry A.M. // Smart Materials and Structures. - 2008. - Т. 17. - № 4. - С. 043001.

20. Бугайов. В. Збірники енергії вібрацій від Mide Technology приходять на зміну батареям / Бугайов. В., Дідук В., Мусієнко М. // Новини електроніки. – 2015. – №5. – С. 5.
21. ZOHREH ALAEI (2016) *Pidvyshennya energoefektyvnosti piezoelektrychnyh harvestoriv* [Power Enhancement in Piezoelectric Energy Harvesting]. STOCKHOLM, SWEDEN: DEGREE PROJECT IN ELECTRONICS AND COMPUTER ENGINEERING, FIRST CYCLE, 15 CREDITS. (in English)
22. CMOS Circuits for Piezoelectric Energy Harvesters. Efficient Power Extraction, Interface Modeling and Loss Analysis
23. Dibin Zhu, Steve Beeby, John Tudor, Neil White and Nick Harris (2011) *Pidvyshennya vyhidnoi potuzhnosti piezoelektrychnyh harvestoriv z vykorystanniam bagatosharovyh struktur* [Improving Output Power of Piezoelectric Energy Harvesters using Multilayer Structures]. Greece: School of Electronics and Computer Science, University of Southampton, UK. (in English)
24. Shad Roundy, Paul Kenneth Wright, Jan M. Rabaey (2004) *Poglynannya energii dlya merezh bezdrotovyh datchyviv z osoblyvym fokusuvannyam na vibraciyah* [Energy scavenging for wireless sensor networks with Special Focus on Vibrations]. California: UC Berkeley. (in English)
25. Song HC et al. Multilayer piezoelectric energy scavenger for large current generation. J. Electroceram. 2009; 23:301-4.
26. Zhu D, Almusallam A, Beeby SP, Tudor J, Harris NR. A bimorph multi-layer piezoelectric vibration energy harvester. Proc. PowerMEMS 2011
27. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні ре- комендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.
28. Антамонов В.Х., Курило І.А., «Обрані задачі по лінійним електричним колам»: Учебный посібник. – К: НМК ВО. – 1993. – 96с.

29. Sushanta Kundua, Harshal B. Nemadea (2015) *Modeliuvannya piezoelektrychnogo vibraciinogo harvestora* [Modeling and Simulation of a Piezoelectric Vibration Energy Harvester]. Guwahati: 12th International Conference on Vibration Problems, ICOVP 2015. (in English)

30. А.В. Кинкурогова. Оптимізація геометричних розмірів п'єзоелектричного віброгенератора // XI Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка-2018». – К: «НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». – 2018. – с.42-45.

31. А.В. Кинкурогова. Розрахунок оптимальних розмірів п'єзоелектричного віброгенератора напруги // XVII Всеукраїнська наукова конференція молодих вчених та студентів «Наукові розробки молоді на сучасному етапі». – К: «Київський національний університет технологій та дизайну». – 2018

ДОДАТОК 1

ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ В MATLAB

«Задача оптимізації параметрів пластини п'єзоелектричного генератора
напруги»

до магістерської дисертації

на тему

«Підвищення енергоефективності п'єзоелектричних генераторів напруги»

```
function f = optnew(x)
```

```
% Задаємо параметри пластини з п'єзоелектричного матеріалу
```

```
% b=x(1) ширина пластини
```

```
% l=x(2) довжина пластини
```

```
% h=x(3) висота пластини
```

```
% Задаємо вхідні параметри механічної складової системи
```

```
m=4*10^(-3); % інерційна маса
```

```
A=2.5; % прискорення коливань
```

```
kp=2.9762*10^(6); % жорсткість п'єзоматеріалу
```

```
Cp=1.2811*10^(-8); % п'єзоелектрична ємність
```

```
N=0.0815; % коефіцієнт електромеханічного зв'язку
```

```
% Задаємо параметри п'єзоелектричного матеріала PZT-5H
```

```
s11=16.8*10^(-12); % пружна піддатливість
```

```
d31=274*10^(-12); % п'єзоелектрична стала деформації
```

```
e33e0=3400; % діелектрична стала
```

```
e0=8.85*10^(-12); % електрична стала
```

```
e33=e33e0*e0
```

```
d=(m*A)^2/(4*0.323*10^(-3)) % коефіцієнт загасання
```

```
w0=2*pi*105 % резонансна частота розриву
```

```
ws=2*pi*100 % резонансна частота замикання
```


$ks=N^2*ws^2/(Cp*(w0^2-ws^2))-kp$ % жорсткість механічної пружини

$w=\sqrt{2*ks/m}$ % частота вхідних коливань

$C=(e33-d31^2/s11)*x(1)*x(2)/x(3)$ % електрична ємність

$n=d31*x(1)/s11$ % коефіцієнт трансформації

% квадрат коефіцієнта передачі за нпругою в узгодженому режимі

$Ku=0.5/(n^2-\sqrt{n^4-4*d^2*w^2*C^2})$

% коефіцієнт передачі за нпругою в узгодженому режимі

$Ku0=\sqrt{Ku}$

% максимальне значення вихідної напруги

$U0=m*A*Ku0$

% оптимальне значення провідності навантаження

$G0=n^2/(2*d)-\sqrt{(n^2/(2*d))^2-w^2*C^2}$

% цільова функція – максимальна електрична потужність

$f=U0^2*G0$

ДОДАТОК 2

ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ В MATLAB

«Обмеження задачі оптимізації»

до магістерської дисертації

на тему

«Підвищення енергоефективності п'єзоелектричних генераторів напруги»

```
function [c, ceq]=cnew(x)
```

```
% Задаємо параметри пластини з п'єзоелектричного матеріалу
```

```
% b=x(1) ширина пластини
```

```
% l=x(2) довжина пластини
```

```
% h=x(3) висота пластини
```

```
% Записуємо обмеження нерівності
```

```
c = [2*10^(-3)-x(1);
```

```
      x(1)-10^(-2);
```

```
      0.2*10^(-3)-x(3);
```

```
      x(3)-2*10^(-3);
```

```
      3.7*10^(-2)-x(2);
```

```
      x(2)-6*10^(-2);
```

```
      x(1)*x(2)*x(3)-125*10^(-9);
```

```
      -(x(1)*x(3)/x(2))+2*(s11^2*w*d/d31^2*(e33-d31^2/s11);
```

```
      x(1)*x(3)/x(2)-s11*(m*w^2-ks)]
```

```
ceq = [];
```